



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## **TREBALL FI DE CARRERA**

### **Títol**

**ESTUDI DEL COMPORTAMENT EN SERVEI I EN  
RUPTURA DE PILES TUBULARS D'ACER EN PONTS**

**INTEGRALS**

**706-TRE-OP-4018**

### **Autor/a**

**Carlos David García Rodríguez**

### **Tutor/a**

**Esther Real Saladrigas**

**Rolando Antonio Chacón Flores**

### **Departament**

**Enginyeria de la Construcció**

### **Data**

**Octubre 2009**

## RESUM

Un pont integral és aquell que prescindeix de juntes i d'elements de recolzament. La manca d'aquests elements provoca un augment de la durabilitat i robustesa del pont. Malgrat tots aquests beneficis, actualment a l'Estat Espanyol pràcticament no es construeixen ponts integrals, ja que tenen un càlcul molt complicat. Però en els últims anys, els països més desenvolupats estan considerant aquesta solució ja que implica una reducció molt important en els costos de les tasques de manteniment.

Les normatives espanyoles vigents referents a ponts, no contemplen les accions a adoptar per a definir els esforços que sofreixen aquesta mena de ponts i quines són les recomanacions a considerar per al dimensionament. És per aquest motiu que el Ministerio de Fomento ha iniciat un projecte titulat *"Seguridad i funcionalidad de los puentes integrales de ferrocarril frente acciones accidentales. Investigación para el establecimiento de criterios de diseño y construcción"*, on el present treball s'emmarca.

L'objectiu d'aquest treball és analitzar els criteris de resistència e inestabilitat de les piles d'un pont integral i valorar la pèrdua de ductilitat de la pila a mesura que augmenta la compressió de la mateixa.

Per assolir aquests objectius, s'ha portat a terme una campanya experimental de set piles de pont de secció circular buida d'acer, de límit elàstic de  $355 \text{ N/mm}^2$ . Aquestes piles tenen diàmetres, espessors i longituds diferents per estudiar quina és la influència que tenen aquests paràmetres en el comportament en servei i col·lapse. La campanya experimental consisteix en un primer anàlisi d'inestabilitat i un segon anàlisi no lineal on es sol·licita la pila amb una força horitzontal en el cap d'aquesta.

Al marge de la campanya experimental s'ha realitzat un estudi de quin és el tractament que realitzen les diferents normatives per considerar els valors de les accions més freqüents que actuen sobre piles de ponts integrals que provocaran efectes no estudiats sobre aquestes.

Finalment, s'han exposat les conclusions dels anàlisis, així com les recomanacions per als futurs estudis.

## ABSTRACT

An integral bridge is a specific kind of bridge built without joints and support elements. The lack of these elements causes an increase of the bridge's longevity and robustness. Despite those benefits, nowadays there are almost no projects of integral bridges in Spain, because their construction requires complicated calculations. During the last years, most developed countries are considering the construction of these bridges because it involves a considerable reduction of maintenance costs.

Bridges' current Spanish legislations, do not include actions to take efforts to define who suffer this kind of bridges and what to consider recommendations for sizing. This is why the Ministerio de Fomento has started a project called *"Seguridad i funcionalidad de los puentes integrales de ferrocarril frente acciones accidentales. Investigación para el establecimiento de criterios de diseño y construcción"*, where the present study is focused on this project.

The aim of this paper is to analyze the criteria of instability and resistance of piles of a bridge and evaluate the overall loss of ductility of the pile when it increases the compression.

In order to reach these objectives, we have set up an experimental campaign consisting in a seven circular steel empty bridge pillars with an elastic limit of  $355 \text{ N/mm}^2$ . These pillars have different diameters, thickness and length in order to study these parameters' influence in the case of collapse and normal service. This experimental campaign consists of two phases. Firstly, an instability analysis and, secondly, in a non linear study where a pillar supports an horizontal directed force in its top.

Besides this campaign, we have studied the different legislations and its considerations about the mentioned subjects. The aim of our study is to take into consideration the most frequent actions that have an influence over the pillars of integral bridges; we have also considered the potential non studied effects over these structures.

Finally, we have presented the conclusions of the analysis and recommendations for future studies.

## Índex

1. Introducció .....	1
1.1. Introducció .....	1
1.2. Objectius .....	1
1.3. Contingut del document .....	2
2. Estat del coneixement .....	3
2.1. Ponts Integrals .....	3
2.2. La Pila Dúctil .....	5
2.3. Norma .....	7
2.3.1. Normes relacionades amb els ponts .....	7
2.3.2. Normes relacionades amb les estructures metàl·liques .....	11
2.4. Esforços de primer ordre .....	14
2.4.1. Elements comprimits .....	14
2.4.2. Elements flectats .....	14
2.4.3. Interacció Axil – Flector .....	15
2.5. Esforços de segon ordre .....	16
2.5.1. Vinclament .....	16
2.5.2. Interacció Axil – Flector .....	19
3. Càlcul Piles .....	20
3.1. Dimensionament .....	20
3.2. Determinació d'esforços .....	22
3.2.1. Model numèric .....	23
3.2.2. Anàlisi de Buckle .....	26
3.2.3. Anàlisi no lineal .....	28
3.3. Resultats .....	29
3.3.1. Anàlisi de Buckle .....	29
3.3.2. Anàlisi no lineal .....	34
4. Anàlisis de Resultats .....	53
4.1. Anàlisi de Buckle .....	53
4.2. Anàlisi no lineal .....	53
4.2.1. Peces Classe 3 .....	56
4.2.2. Peces Classe 2 .....	60
4.2.3. Peces Classe 1 .....	63
5. Conclusions .....	69
6. Perspectives futures .....	71
7. Referències bibliogràfiques .....	72
8. Annex .....	73

## **1. Introducció**

### **1.1. Introducció**

Aquest treball s'emmarca dins d'un projecte de recerca titulat "Seguridad y funcionalidad de los puentes integrales de ferrocarril frente acciones accidentales. Investigación para el establecimiento de criterios de diseño y construcción" del Ministerio de Fomento que es du a terme actualment al Departament d'Enginyeria de la Construcció de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Els ponts integrals no són molt utilitzats actualment donat el complicat càlcul que implica dimensionar-los. Malgrat això, antigament la majoria de ponts eren integrals. Molts d'aquests ponts han arribat als nostres dies donat que són elements molt robustos i duradors. Són aquests els motius pels quals actualment els països més desenvolupats estan tornant al concepte integral, que implica menys tasques de manteniment i millor comportament davant accions accidentals.

El coneixement del comportament d'un pont integral en condicions de servei i col·lapse és essencial per a un correcte dimensionament d'aquests. Actualment, en l'àmbit dels ponts integrals, no estan considerats en cap normativa els criteris ni les recomanacions per un correcte dimensionament i execució, exceptuant la publicació realitzada per la empresa Esteyco "Guía para la Concepción de Puentes Integrales de Carretera" (GCPIC, 2000). És per això que s'ha iniciat el projecte on s'emmarca aquest treball.

Pel que fa als diferents elements que formen un pont integral, aquest treball es centra en les piles. Les piles són un dels tres elements principals que formen un pont i s'encarreguen de transmetre les càrregues verticals i horitzontals al terreny. En els ponts convencionals, les càrregues horitzontals provocades pels moviments horitzontals per sobre de les piles són absorbides per elements de recolzament, però en els ponts integrals aquests elements de recolzament no existeixen ja que tota la estructura és continua i les piles són les encarregades d'absorbir-les. Les normatives actuals no contemplen criteris d'avaluació per aquests moviments, per tant l'estudi del rang de desplaçaments admissibles és vital per a un correcte dimensionament.

### **1.2. Objectius**

Aquest treball pretén ser una introducció a l'anàlisi del comportament de les piles d'un pont integral construïdes amb acer. Aconseguir unes directrius bàsiques per enfocar de forma correcta l'anàlisi en profunditat de la Pila Dúctil, és el principal objectiu.

Els objectius específics són:

- L'estudi del tractament que realitzen les diferents normatives per considerar els valors de les accions més freqüents que actuen sobre les piles d'un pont integral i que provocaran efectes no estudiats sobre aquestes.
- Analitzar els criteris de resistència e inestabilitat per diferents piles estudiades amb diferents diàmetres, longitud i espessor.
- Valorar la pèrdua de ductilitat de la pila a mesura que augmenta la compressió de la mateixa.

### **1.3. Contingut del document**

El present treball està format per 8 apartats: introducció, estat del coneixement, càlculs, anàlisi de resultats, conclusions, perspectives futures, referències bibliogràfiques i annexes.

L'apartat 2 (Estat del coneixement) introdueix als ponts integrals i al concepte de la pila dúctil. En aquest capítol també hi figuren els criteris de dimensionament adoptats per les diferents normatives que han estat tinguts en compte per a la realització d'aquest treball.

A l'apartat 3 (Càlcul Piles) es troben les descripcions de les peces objecte d'aquest estudi, la determinació dels esforços obtinguts a partir dels models numèrics i els seus resultats.

En l'apartat 4 (Anàlisi de Resultats), s'analitza el comportament observat de les peces estudiades, exposat anteriorment, posant de manifest la influència de diferents factors i variables en la resistència d'aquestes.

L'apartat 5 conclou la recerca del treball, exposant les conclusions generals i específiques, derivades de les anàlisis exposades anteriorment.

L'apartat 6 (Perspectives futures) realitza una proposta de com s'haurien de encaminar els futurs estudis relacionats amb el concepte de ponts integrals.

L'apartat 7, de referències bibliogràfiques, conté aquelles que han estat consultades per a la realització del treball.

Finalment, en l'annex que figura com apartat 8, es mostren els càlculs que fonamenten tot el treball exposat en els punts anteriors.

## **2. Estat del coneixement**

### **2.1. Ponts integrals**

Un pont integral és aquell que no disposa d'aparells de recolzament ni juntes de dilatació, tant en piles com en estreps. Si en els estreps es disposen recolzaments es coneixen com a ponts semi-integrals. El fet de prescindir de juntes i aparells de recolzament implica que les estructures són més duradores, robustes i més tolerants davant sol·licitacions accidentals.



**Figura 2.1: Exemple de pont integral construït a Saragossa.**

Aquest concepte no és nou, tot al contrari, fins al segle XIX tots els ponts eren integrals. Amb el desenvolupament dels ponts metàl·lics i l'aparició del formigó armat, sorgeix la necessitat d'absorbir els moviments del tauler d'origen tèrmic i reològic, i amb això es va generalitzar l'ús de juntes i aparells de recolzament.



**Figura 2.2: Exemple de pont integral antic, construït pels romans a la ciutat d'Alcàntara.**

L'apogeu dels ponts isostàtics de bigues prefabricades des de els anys 60 implica l'ús de nombrosos recolzaments de neoprè sota els extrems de les bigues i de juntes de dilatació intermèdies entre elles.

En les últimes dècades es desenvolupen ponts continus de formigó armat pretensat i mixtes que eliminen les juntes intermèdies entre vànols, però requereixen de recolzaments de neoprè de major altura i juntes de més recorregut. El mateix succeeix en els ponts prefabricats, en els que es tendeix a eliminar parcial o totalment les juntes donant continuïtat a la llosa de compressió; i més recentment es desenvolupen solucions prefabricades amb continuïtat posterior mitjançant postesats.

És a dir, l'evolució en els últims 100 anys en la concepció de ponts parteix de l'ús generalitzat de taulers isostàtics amb nombroses juntes i aparells de recolzament cap a la progressiva eliminació de les juntes intermèdies i reducció en el número de recolzaments. Els països que més han avançat en aquesta tendència són els Estats Units, que realitzen ponts integrals des dels anys 50, i el Regne Unit en els últims 20 anys.

Recentment la preocupació per la durabilitat dels ponts és molt important en tots els països desenvolupats, tant en l'ampliació de la vida útil de ponts que necessiten reparacions com en la preocupació per la major durabilitat de les noves estructures a construir.

Els costos de manteniment dels ponts s'han desbordat en els últims anys, començant pels Estats Units que posseeix la més extensa xarxa de carreteres amb el nombre més gran de ponts d'una certa antiguitat. Serveixi com a exemple que en el any 2003 a Estats Units hi havia 160.570 ponts funcionalment obsolets o estructuralment deficients (el 27% del total), el que suposa un cost estimat de 9,4 milions de dòlars anuals pels pròxims 20 anys. A Europa, Alemanya i el Regne Unit van ésser els primers països en prendre mesures per millorar la durabilitat dels ponts.

La tendència mostrada pels països que ja han afrontat aquests problemes és la reducció de l'ús, sempre que sigui tècnicament possible i aconsellable, dels elements que requereixen major freqüència d'operacions de manteniment i conservació, és a dir les juntes i els aparells de recolzament que posseeixen una vida útil molt inferior a la dels ponts.

En resum és pot dir que els ponts integrals són més econòmics que els ponts convencionals tant des del punt de vista constructiu com del manteniment. Els aparells de recolzament i juntes són cars d'adquirir, instal·lar, mantenir, reparar i substituir. Els problemes de corrosió més freqüents es produeixen pel pas d'aigua amb sals des de la calçada a través de les juntes als extrems dels taulers (resulta especialment problemàtic en bigues de formigó i metàl·liques), als recolzaments i a la infraestructura. Les juntes s'omplen amb brutícia, pedres i brossa, i poden perdre les seves funcionalitats.

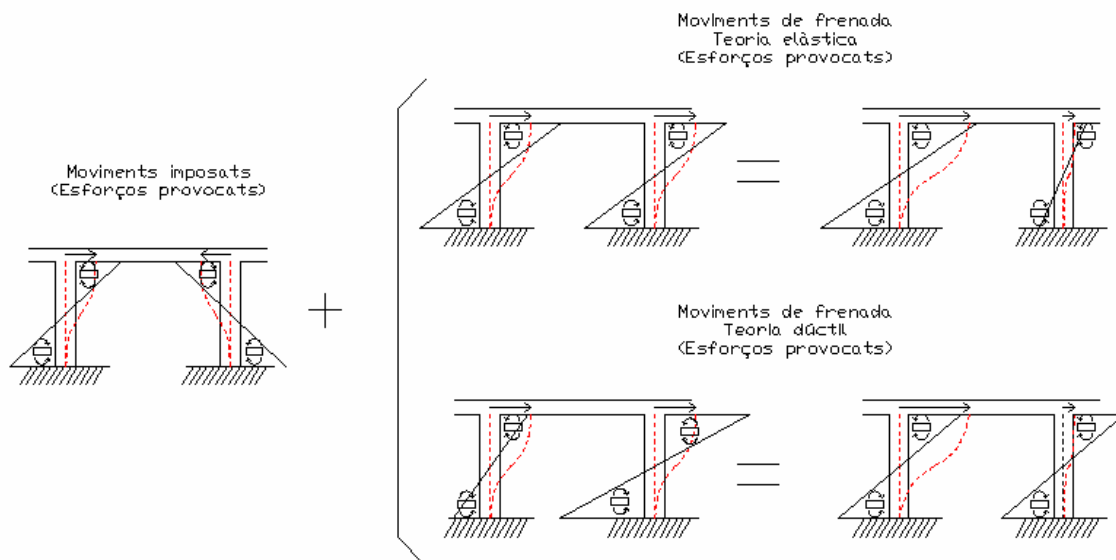


## 2.2. La pila dúctil

En contrapartida a aquests avantatges, les piles dels ponts integrals han d'ésser capaces d'acompanyar el tauler en els seus desplaçaments durant el temps. Aquest fet introdueix esforços en les piles que es deuen controlar i han d'ésser compatibles tant en la funcionalitat com en la capacitat última de l'estructura. Aquest és el context de la pila dúctil.

Piles suficientment dúctils impliquen que els esforços derivats de deformacions imposades no minoren la capacitat resistent última del conjunt de piles per absorbir esforços longitudinals. Això vol dir que, la reducció de capacitat estructural d'una pila provocada per dilatacions o contraccions del tauler, no suposa una disminució de la capacitat estructural de tot el conjunt de piles, ja que quedarà compensada per l'augment de capacitat d'una altra pila. Tot això referit al comportament longitudinal i en base a un comportament suficientment dúctil.

Si es considera un fragment de pont integral sotmès primer a deformacions imposades per contracció del tauler i després a les forces de frenada, es produeixen deformacions en un sentit o el oposat en funció de la pila en qüestió. És a dir, si es produeix contracció del tauler, les piles sofriran la mateixa deformació però en sentits oposats. Si després es produeix un esforç de frenada, es produirà la mateixa deformació a les dues piles i amb el mateix sentit. En cada pila s'haurà d'avaluar la deformació total. Una de les piles sumarà la seva deformació prèvia amb aquesta nova, en canvi l'altra pila disminuirà la deformació prèvia, podent fins i tot canviar el sentit de la deformació inicial. A continuació es presenta la figura 2.3 que descriu el procés explicat i afegeix els esforços derivats d'aquest desplaçaments en funció de la teoria elàstica i la dúctil.

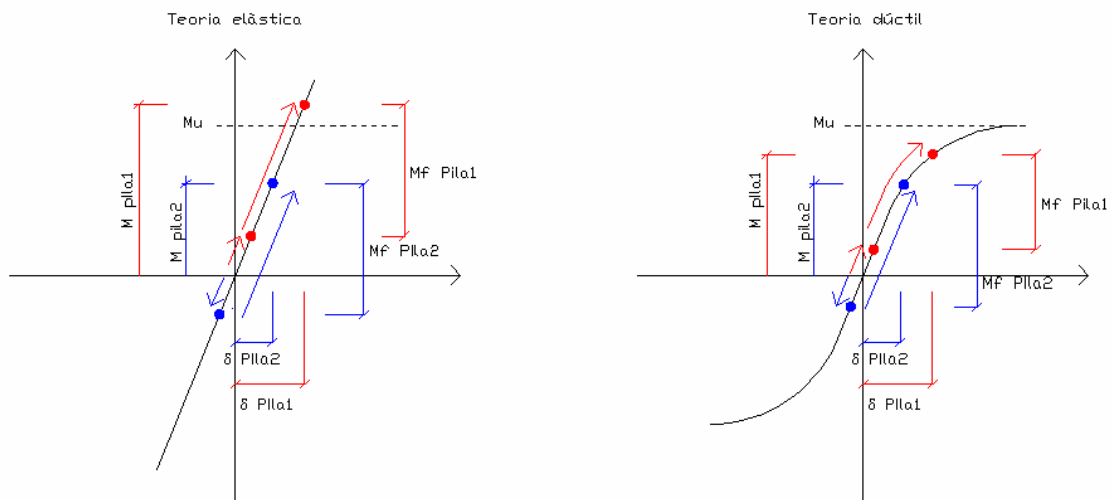


**Figura 2.3: Esquema dels moviments de les piles d'un pont integral en teoria lineal i teoria dúctil.**

S'observa que en la teoria elàstica els esforços derivats de les forces de frenada són iguals en les dues piles, provocant que la pila on coincideixen en els sentits els desplaçaments imposats i els desplaçaments de frenada sofreixi esforços considerablement més elevats que a l'altra pila. En el cas dúctil, la pila on coincideixen

els sentits dels desplaçaments imposats i els de frenada es comporta de forma menys rígida i, per tant, l'altra pila absorbeix més esforços. En resum, la ductilitat permet que la pila menys sol·licitada agafi major part de la càrrega, descarregant així la pila més sol·licitada.

Això es pot explicar de forma senzilla a través del diagrama Moment – Desplaçament d'una pila que es representa a la figura 2.4. El diagrama de l'esquerra de la figura 2.4 mostra el comportament de les piles amb criteris elàstics, en canvi el diagrama de la dreta mostra el comportament de les piles amb criteris dúctils. En vermell es representa la Pila 1, que és on coincideixen en sentit la deformació imposada prèvia i la deformació de frenada, i en blau es representa la Pila 2, que es on la deformació imposada prèvia té sentit contrari a la deformació de frenada.



**Figura 2.4: Diagrama M -  $\delta$  de la teoria elàstica i la teoria dúctil**

S'observa en la figura 2.4, que en la teoria elàstica la Pila 1 té una càrrega final (Valor  $M$  a la gràfica) molt superior a la de la Pila 2. Es podria arribar al cas que la Pila 2 arribés a superar el moment últim i, per tant, l'estructura no resistís. Però això no succeeix si es considera la teoria dúctil perquè, com ja s'ha explicat, la pila menys sol·licitada agafa major part dels esforços de frenada i, per tant, la més sol·licitada no té problemes de resistència estructural.

Tots aquest comentaris busquen remarcar la importància del comportament dúctil de la pila i com la seva correcta caracterització pot ser molt favorable a l'hora de dissenyar un pont integral.

Aquest efecte positiu de ductilitat té una complicada caracterització numèrica i requereix de models no lineals per a la seva resolució.

## **2.3. Norma**

Dins del marc d'aquest treball hi ha tot un seguit de normatives i recomanacions relacionades amb els ponts o els ponts integrals. Aquests documents presenten definicions de les accions i dels valors resistents a considerar en el disseny d'un pont.

Pel que fa a les accions, la majoria coincideixen amb les valorades en els ponts convencionals, com per exemple les forces verticals. Però, succeeix, com ja s'ha explicat en els apartats 2.1 i 2.2, que les forces horitzontals a considerar produeixen esforços en les piles dels ponts integrals, les quals no es tenen en compte en les piles dels ponts convencionals.

Aquest apartat, és el resultat de la recerca entre, les diferents normatives, per avaluar quins són els criteris establerts per al disseny d'un pont integral. S'han establert dos marcs de recerca diferents, el primer és el de les normatives relacionades amb els ponts o ponts integrals, el segon és el de les normatives relacionades amb el material acer.

### **2.3.1. Normes relacionades amb els ponts/ponts integrals**

A continuació es presenten les normes i recomanacions consultades per a l'elaboració d'aquest treball, utilitzades per a l'obtenció de dades i l'execució dels càlculs necessaris:

- IAP-98 "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera". Editada pel Ministerio de Fomento. (IAP, 1998)
- IAPF-07 "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril". Editada pel Ministerio de Fomento. (IAPF, 2007)
- "Guía para la concepción de puentes integrales en carreteras". Editada pel Ministerio de Fomento. (GCPIC, 2000)

Exceptuant la IAPF (2007), les guies esmentades pertanyen a un camp d'aplicació fora del marc del projecte on s'emmarca aquest treball, però s'han considerat dintre d'aquest perquè la IAP (1998) realitza una definició d'accions sobre ponts de carretera, possibles candidats a ponts integrals en un futur, i la GCPIC (2000) és la única guia vigent a l'Estat per a la concepció de Ponts Integrals. El motiu de l'elecció de la IAPF és consultar la definició d'accions sobre ponts de ferrocarril que es tracten en el projecte on s'emmarca aquest treball.

La norma IAP-98 (1998), "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera", és un document vigent en l'Estat Espanyol i és d'obligat compliment per als projectes de ponts de carretera. En aquesta instrucció es defineixen les accions a considerar durant la vida útil del pont o durant la construcció d'aquest. Dins del marc d'aquest treball, s'ha considerat l'avaluació de les accions verticals i de les accions horitzontals de caràcter longitudinal.

Accions verticals de valor constant:

- Pes propi: El que correspon als elements estructurals del pont. En el cas d'aquest treball, acer ( $77 \text{ kN/m}^3$ ).

- Càrregues mortes: Càrregues corresponents als elements no estructurals que graviten sobre l'estructura, com el paviment, les voreres, serveis, etc.

#### Accions verticals de valor no constant:

- Tren de càrregues: La definició del tren de càrregues per a ponts de carreteres correspon a tres accions actuant simultàniament. Una primera acció definida com una càrrega repartida uniformement sobre tota la plataforma del tauler o part d'ella (Considerant el cas més desfavorable) de valor quatre kilonewtons per metre quadrat ( $4 \text{ kN/m}^2$ ). La segona acció es defineix com a un o dos vehicles pesats de sis-cents kilonewtons (600 kN) de pes formats per sis càrregues puntuals de cent kilonewtons (100 kN). Si l'amplada del tauler és menor a dotze metres es considera que només actua un vehicle pesat, en el cas que sigui major de dotze metres, aleshores actuaran un o dos vehicles pesats, segons sigui més desfavorable. La tercera acció es defineix com a una càrrega repartida uniforme de valor quatre kilonewtons per metre quadrat ( $4 \text{ kN/m}^2$ ) situada sobre totes les parts del tauler que estiguin físicament separades de la plataforma.
- Tren de càrregues per la fatiga: Les accions repetitives de previsible durant la vida útil d'una estructura, poden ser definides com a models simplificats de càrrega. Si es considera que el fenomen de la fatiga és provocat pel tràfic, es considerarà el mateix com el mateix vehicle pesat considerat en el tren de càrregues, però amb una càrrega total de tres-cents noranta kilonewtons (390kN) de pes total format per sis càrregues de seixanta-cinc kilonewtons (65 kN). A aquest valor se li aplicarà un coeficient dinàmic multiplicador de valor d'u coma dos (1,2). Aquesta càrrega es situarà en la posició més desfavorable.

#### Accions horitzontals longitudinals:

- Frenada i arrencada: La frenada, l'arrencada o el canvi de velocitat dels vehicles que transiten per sobre del pont, provocaran una acció que s'estima en una vintena part dels esforços provocats pel tren de càrregues. En el cas que el pont disposi de dos sentits de circulació, es considerarà com a sentit únic si aquesta hipòtesi és més desfavorable. Els valors mínims i màxims per aquesta acció que pot actuar en tota l'amplada del pont queda acotat entre els valors màxims i mínims següents:

Valor mínim (kN):  $20 \cdot b \geq 140 \text{ kN}$

Valor màxim (kN):  $60 \cdot b \leq 720 \text{ kN}$

On  $b$  és l'amplada del tauler en metres.

Aquestes accions es consideraran aplicades en la direcció de l'eix de la plataforma del tauler, actuant a nivell de calçada, com a una força repartida uniformement distribuïda en una longitud  $L_F$  que s'avaluarà com la menor de les següents distàncies en la hipòtesi més desfavorable:

- Longitud del tram de pont entre dues juntes, o de tot el pont si no té juntes.
- 270 m.

La norma IAPF-07, "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril", és un document d'obligat compliment per als projectes de ponts de ferrocarril. En aquest document es realitza un seguit de definicions d'accions a tenir presents per a situacions en vida útil del pont o en fase de construcció. Dins d'aquest treball, s'han considerat l'avaluació de les accions verticals i de les accions horitzontals longitudinals.

Accions verticals de valor constant:

- Pes propi: El que correspon als elements estructurals del pont. En el cas d'aquest treball, acer ( $77 \text{ kN/m}^3$ ).
- Càrregues mortes: Càrregues corresponents als elements no estructurals que graviten sobre l'estructura, com el balast, les travesses, els carrils, els murets guardabalast, elements d'electrificació, etc.

Accions verticals de valor no constant:

- Tren de càrregues ferroviàries: La càrrega estàtica produïda pel pes de vehicles ferroviaris sobre una via, s'assimilarà a la del tren UIC (tren de referència per a la Unió Internacional de ferrocarrils d'amplada mètrica), aplicada al eix de la via i a nivell del seu pla de rodadura. Es defineix per a les accions següents: Quatre eixos de dos cents cinquanta kilonewtons ( $250 \text{ kN}$ ) separat entre si 1,6 metres en la posició que sigui més desfavorable i una sobrecàrrega repartida de vuitanta kilonewtons ( $80 \text{ kN/m}^2$ ) estesa en la longitud i posició que sigui més desfavorable. Aquests valors es multiplicaran per uns coeficients  $\alpha$  en funció de l'amplada de via ( $\alpha = 1.21$  per ample ibèric i  $\alpha = 0.91$  per vies d'amplada mètrica).
- Efectes dinàmics deguts al tràfic: Les sol·licitacions i deformacions reals d'un pont provocades pel tràfic són de caràcter dinàmic. Els seus valors poden ser considerablement més elevats que els provocats per accions estàtiques. Aquesta acció es considerarà com a un factor d'impacte que es defineix com a la sol·licitació màxima real provocada per tots els possibles trens i totes les possibles velocitats reals que puguin circular, entre la sol·licitació estàtica provocada pel tren tipus UIC definit abans. Aquest coeficient mai serà inferior a 1.
- Càrregues no ferroviàries: Les càrregues de voreres, elements per a serveis i zones del tauler no afectades pel pas de tràfic ferroviari s'assimilaran com a sobrecàrregues verticals uniformes de cinc kilonewtons per metre quadrat ( $5 \text{ kN/m}^2$ ).

#### Accions horitzontals longitudinals:

- Frenada i arrencada: les accions de frenada i arrencada dels vehicles ferroviaris s'assimilaran com a forces horitzontals, paral·leles a la via, repartides uniformement al llarg d'una determinada longitud i aplicades al nivell mig del pla de rodadura. També, com s'ha vist al tren de càrregues ferroviàries, aquestes es veuen afectades per un factor corrector en funció del tipus d'amplada de via. (20 kN/m i L = 300 per la frenada; 33 kN/m i L = 30 per l'arrencada).

Totes aquestes accions definides pretenen ser l'origen de les accions considerades en el present treball: Accions verticals de valor constant o no constant i accions horitzontals de caràcter longitudinal.

La "Guía para la concepción de puentes integrales en carreteras" és un document que vol aprofitar l'experiència internacional, que combinada amb la normativa i la pràctica enginyeril del nostre país, serveixi com a referència a l'hora de concebre un pont integral. Aquest document inclou un apartat on es defineixen els orígens dels moviments dels ponts i un altre apartat on defineix numèricament aquests moviments. A continuació es recullen el conjunt de valors considerats per aquest treball i les seves expressions numèriques:

- Retracció: Moviment intrínsec de les estructures de formigó. Les expressions numèriques d'aquests valors estan definides a la Instrucció EHE-08 (2008). Per a taulers de formigó armat acostumen a situar-se en el rang de deformacions unitàries de  $250 \times 10^{-6}$  a  $300 \times 10^{-4}$ . En el cas de ponts de tauler mixt l'escurçament per retracció de la llosa de formigó es veu coaccionat per les bigues metàl·liques, per això el valor corregit a considerar és:

$$\varepsilon_{r,c} = \varepsilon_r \frac{A_h}{A_h + n \cdot A_a}$$

On  $A_h$  és l'àrea de formigó,  $A_a$  l'àrea d'acer i  $n$  pren el valor de 12.

- Pretesat: Moviment intrínsec de les estructures de formigó pretesat. La precompressió en el tauler de formigó armat es tradueix en escurçaments, té dues components: una instantània i una diferida. Els càlculs d'aquests valors són els que habitualment es realitzen en ponts convencionals de formigó pretesat i postesat. Els ordres de magnitud per aquests valors són:

Escurçaments instantanis: de  $120 \times 10^{-6}$  a  $360 \times 10^{-6}$ .

Escurçaments diferits: de  $300 \times 10^{-6}$  a  $900 \times 10^{-6}$ .

- Temperatura: Valor intrínsec de totes les estructures. Són els esforços que tenen més transcendència en la concepció de ponts integrals i els que més condicionen els límits d'utilització d'aquests. Hi ha diferents normes on es tracten aquests valors com ara la IAP (1998), la "Technical memorandum on expansion joints for use in highway bridge decks" (HMSO, 1989) del Regne

Unit o la "AASHTO Bridge specifications" (AASHTO, 1992) Americana. Com a ordre magnitud es pot considerar que la variació de temperatura efectiva en un dia no supera els 4,5°, les variacions mensuals poden suposar 16° i les anuals no arriben a 32°, suposant que el tauler sigui de formigó.

- Frenada i arrencada: Valor provocat per les càrregues exteriors. Es comenten les definides anteriorment a la IAP (1998).

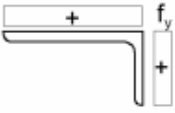
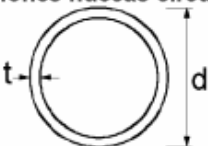
### **2.3.2. Normes relacionades amb les estructures d'acer**

Dins l'Estat Espanyol hi ha un seguit de normatives de diferents camps d'aplicació relacionades amb les estructures metàl·liques. A continuació presentem les normes consultades per a la realització d'aquest treball:

- Eurocódigo 3, "Proyecto de estructuras de acero. Reglas generales y reglas para edificios" UNE-EN 1993-1-1 AENOR. (2008)
- Código técnico de la edificación. Documento básico SE-A Seguridad Estructural Acero. Ministerio de Vivienda. (2006)
- EAE – doc 0. "Instrucción Acero Estructural". Ministerio de fomento. (2004)

Donat que el DB-SE-A (2006) del Código técnico de la edificación limita el seu camp d'aplicació a les edificacions, les normatives de referència que s'han utilitzat en aquest treball són la EAE (2004) i la EN-1993-1-1 (2008).

Totes aquestes normes presenten una classificació de la secció en funció del tipus i dimensions de la mateixa per a realitzar els càlculs de resistència. Per aquest treball, es consideren piles de secció circular buida. A continuació es presenta a la figura 2.5 la classificació que fa les normes Eurocódigo 3 (2008) i la EAE (2004) per aquest tipus de secció.

Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)						
3	$h/t \leq 15\epsilon : \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$					
<b>Secciones huecas circulares</b> 						
Clase	Sección flectada y/o comprimida					
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$					
NOTA: Para $d/t > 90\epsilon^2$ , véase la Norma Europea EN 1993-1-6						
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460
	$\epsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	$\epsilon^2$	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

**Figura 2.5: Classificació de la secció per a seccions tubulars segons EAE i Eurocódigo 3.**

La classificació de seccions es planteja en funció dels fenòmens d'inestabilitat que es produeixen en aquestes seccions. Aquest concepte permet integrar els fenòmens d'inestabilitat en el control resistent de les seccions transversals. A continuació es defineixen els diferents tipus de secció que apareixen en aquest treball:

- Classe 1 (plàstiques): són aquelles que arriben, sense veure's afectades per fenòmens de inestabilitat local (abonyegament) en les zones comprimides, a la seva capacitat resistent plàstica i permeten desenvolupar la capacitat de rotació exigible a una ròtula en un anàlisi global plàstic.
- Classe 2 (compactes): són aquelles que poden arribar al seu moment resistent plàstic, però els fenòmens d'abonyegament limiten la capacitat de rotació per sota de les exigències d'aplicabilitat de l'anàlisi global plàstic.
- Classe 3 (semicompactes): són aquelles que la tensió de la fibra metàl·lica més comprimida, estimada a partir d'una distribució elàstica de tensions, pot arribar al límit d'elasticitat de l'acer, però en les que els fenòmens d'abonyegament impedeixen garantir el desenvolupament de la deformació necessària per arribar el moment resistent plàstic de la secció.

L'Eurocódigo 3 (2008) i la EAE (2004), exigeixen una ductilitat mínima per acers. Aquesta s'expressa en termes de límits de:

- El quocient  $f_u / f_y$  de la resistència última a tracció mínima i el límit elàstic mínim especificat.



- La deformació remanent concentrada de ruptura de una base de mesura de longitud  $5.65\sqrt{A_0}$  (on  $A_0$  és l'àrea de la secció transversal inicial).
- La deformació última  $\epsilon_u$ , on  $\epsilon_u$  correspon a la resistència última a tracció.

Els valors límits del quocient  $f_u / f_y$ , la deformació remanent concentrada de ruptura i la deformació última queden definits a l'annex nacional. Es recomanen els següents valors:

- $f_u / f_y \geq 1,10$
- La deformació remanent concentrada de ruptura no major del 15%.
- $\epsilon_u > 15 \epsilon_y$ , on  $\epsilon_y$  és la deformació corresponent a la del límit elàstic,  $\epsilon_y = \frac{f_y}{E}$ .

Aquestes normes consideren que els acers continguts en la taula 2.1 compleixen els requisits anteriors.

**Taula 2.1: Valors nominals del límit elàstic  $f_y$  i de la resistència a tracció  $f_u$  per acer estructural laminat en calent i per a perfils tubulars.**

Norma y tipo de acero	Espesor nominal del elemento $t$ [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>EN 10025-2</b>				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
<b>EN 10025-3</b>				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
<b>EN 10025-4</b>				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
<b>EN 10025-5</b>				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
<b>EN 10025-6</b>				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

## 2.4. Esforços de primer ordre

Les piles dels ponts estan destinades a transmetre els esforços provocats per la superestructura i el pas de vehicles i/o trens cap al terra. Principalment els esforços del pes de la superestructura i del pas de vehicles estan resistits per esforços de compressió, en canvi els esforços del vent, de frenada o d'impacte de vehicles es transmeten per les piles en forma de moments ( o de tallants com s'explica en l'apartat 2.2). Per tant, s'han de realitzar comprovacions tant a compressió i a flexió, com a l'interacció entre els dos esforços.

### 2.4.1. Elements comprimits

El valor de càlcul de l'esforç axil de compressió  $N_{Ed}$  haurà de complir l'expressió [2-1] per a qualsevol secció transversal.

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd} \quad [2-1]$$

On  $N_{Ed}$  és el valor de càlcul de l'esforç axil i  $N_{c,Rd}$  és la resistència de càlcul de la secció a compressió.

La resistència de càlcul d'una secció per a un esforç a compressió  $N_{c,Rd}$  s'obté mitjançant l'expressió [2-2] per a les seccions classe 1, 2 o 3.

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad [2-2]$$

On  $A$  és l'àrea de la secció,  $f_y$  és el límit elàstic de l'acer i  $\gamma_{M0}$  és el coeficient parcial per la resistència que s'adopta com 1,0.

No s'han de descomptar els forats dels cargols en el dimensionament i comprovació de la resistència seccional dels elements comprimits, sempre que aquests estiguin ocupats per cargols.

### 2.4.2. Elements flectats

El valor de càlcul del moment flector  $M_{Ed}$  haurà de complir per a qualsevol secció transversal l'expressió [2-3].

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd} \quad [2-3]$$

On  $M_{Ed}$  és el valor de càlcul del moment flector i  $M_{c,Rd}$  és la resistència de càlcul de la secció a flexió.

La resistència de càlcul a flexió  $M_{c,Rd}$  al voltant d'un eix principal s'obtindrà mitjançant les següents expressions:

- Per a seccions de classe 1 o 2, l'expressió [2-4].

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad [2-4]$$

- Per a seccions de classe 3, l'expressió [2-5].

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad [2-5]$$

On  $W_{pl}$  i  $W_{el}$  són els mòduls resistents plàstic i elàstic respectivament i depenen de la geometria de la secció. Per al cas de piles circulars buides de diàmetre exterior  $D$  i interior  $d$ , les expressions [2-6] i [2-7] defineixen aquests paràmetres.

$$W_{pl} = \frac{D^3 - d^3}{6} \quad W_{el} = \frac{2 \cdot I}{D} \quad [2-6] \quad [2-7]$$

### 2.4.3. Interacció Axil – flector

Per realitzar la interacció de axil – flector s'han de considerar dos situacions que plantejen efectes diferents en el moment del col·lapse de l'estructura. La primera situació té en compte el col·lapse de l'estructura per qüestions de resistència seccional durant la interacció axil - flector. En la segona situació, el col·lapse es produeix per efectes de vinclament produïts per la interacció entre l'axil i el flector. Les normatives consideren expressions diferents en funció de la situació que es produeix. Per tant, alhora de plantejar una interacció entre axil i flector s'ha de veure en cada cas quina de les dues situacions és més restrictiva.

A continuació es presenten els criteris per a la situació de col·lapse de l'estructura per motius resistents de la secció. L'altra situació s'explica en el apartat 2.5.2, ja que aquesta fa referència als esforços de segon ordre.

Quan existeixi un esforç a compressió combinat amb un esforç de flexió, en el cas que la secció causi fallida per qüestions de resistència de la secció, s'haurà de reduir la resistència plàstica del càlcul de flexió, com s'indica a l'expressió [2-8].

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \quad [2-8]$$

On  $M_{N,Rd}$  és la resistència plàstica de càlcul a flexió reduïda, provocat per la existència de l'esforç a compressió  $N_{Ed}$ .

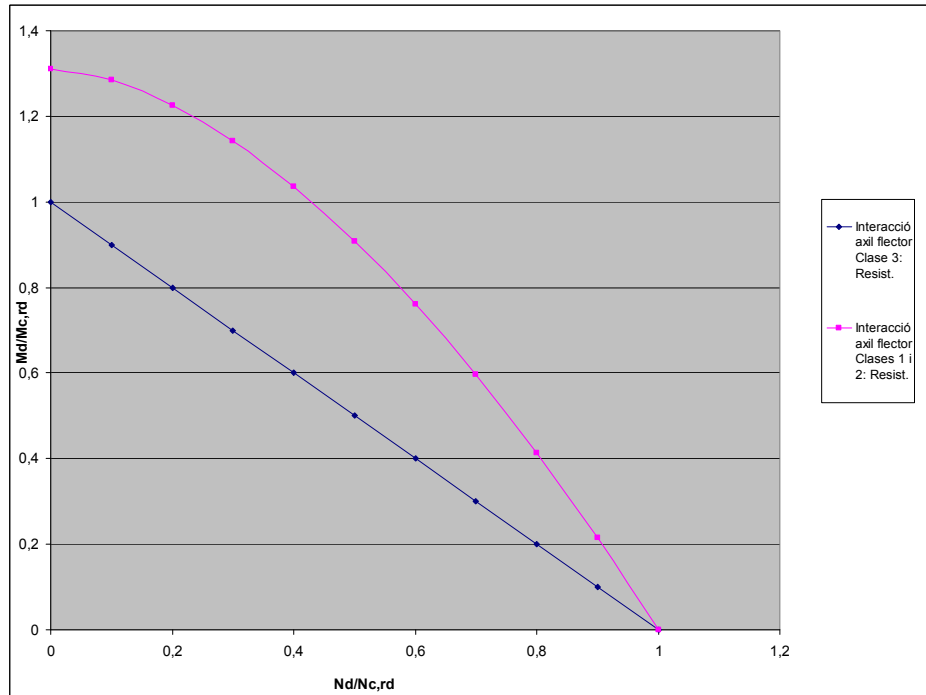
Per a seccions de classe 1 i 2, en seccions circulars buides, és pot utilitzar l'expressió aproximada [2-9] per a l'obtenció de la resistència plàstica a flexió reduïda.

$$M_{N,y,Rd} = M_{N,z,Rd} = M_{c,Rd} \left[ 1 - \left( \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \right)^{1.7} \right] \quad [2-9]$$

Per a seccions de classe 3, en seccions circulars buides, s'haurà de complir l'expressió [2-10] en el punt més sol·licitat:

$$\frac{N_{Ed}}{A \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{Ed}}{W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M0}} \leq 1 \quad [2-10]$$

Amb aquestes dues expressions ([2-9] i [2-10]), es poden definir dues corbes que representen els límits del parell de valors  $N_{Ed}$  i  $M_{Ed}$ . A la figura 2.6 es representen aquestes dues corbes.



**Figura 2.6: Representació gràfica dels valors límits d'axil i moment normalitzats amb els seus valors resistents elàstics respectius en la interacció entre axil i moment, per a les Classes 1, 2 i 3 en situació de fallida per resistència de la secció.**

## 2.5. Esforços de segon ordre

### 2.5.1. Vinclament

Les piles dels ponts estan destinades, principalment, a resistir esforços a compressió. Si estan construïdes amb acer, és probable si són suficientment esveltes, que sofreixin problemes de vinclament; per tant la comprovació de la pila a aquesta mena d'esforços de segon ordre és clau a l'hora de dimensionar les piles d'un pont formades per acer.

Segons la normativa, un element comprimit ha d'ésser comprovat a vinclament segons l'expressió [2-11].

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad [2-11]$$

On  $N_{Ed}$  és el valor de càlcul del esforç axil de compressió i  $N_{b,Rd}$  és la resistència de càlcul a vinclament de l'element comprimit.

La resistència de càlcul a vinclament d'un element sotmès a compressió es determina segons l'expressió [2-12].

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad [2-12]$$

On  $\chi$  és el coeficient de reducció pel mode de vinclament considerat i  $\gamma_{M1}$  el coeficient parcial de seguretat, en el nostre cas de valor 1.

El valor de  $\chi$  s'obté a partir de la esveltesa adimensional i de les corbes europees de vinclament. L'esveltesa queda definida a la norma per a les seccions 1, 2 i 3 segons l'expressió [2-13].

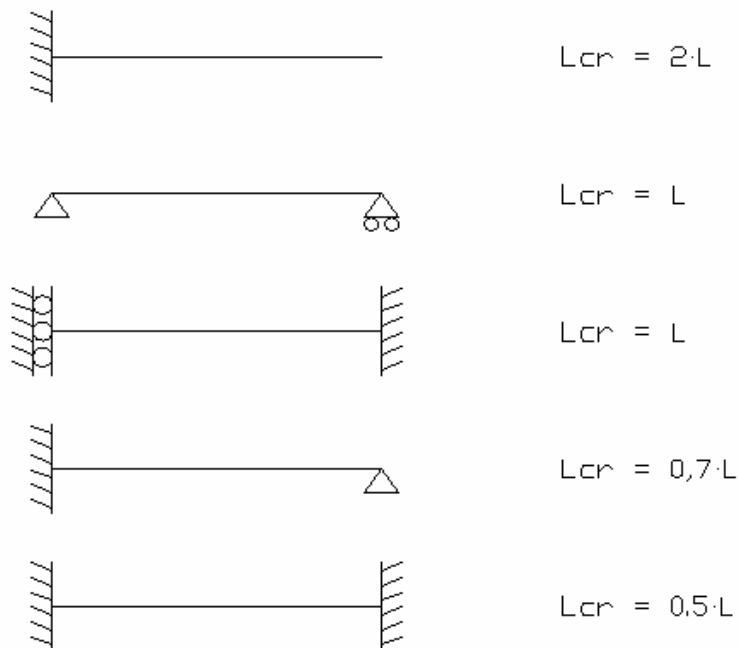
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad [2-13]$$

El paràmetre  $N_{cr}$  és el valor de l'axil crític elàstic per al mode de vinclament considerat (càrrega crítica d'Euler), obtingut amb les característiques de la secció bruta. Aquest valor s'obté a partir de l'expressió [2-14].

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} \quad [2-14]$$

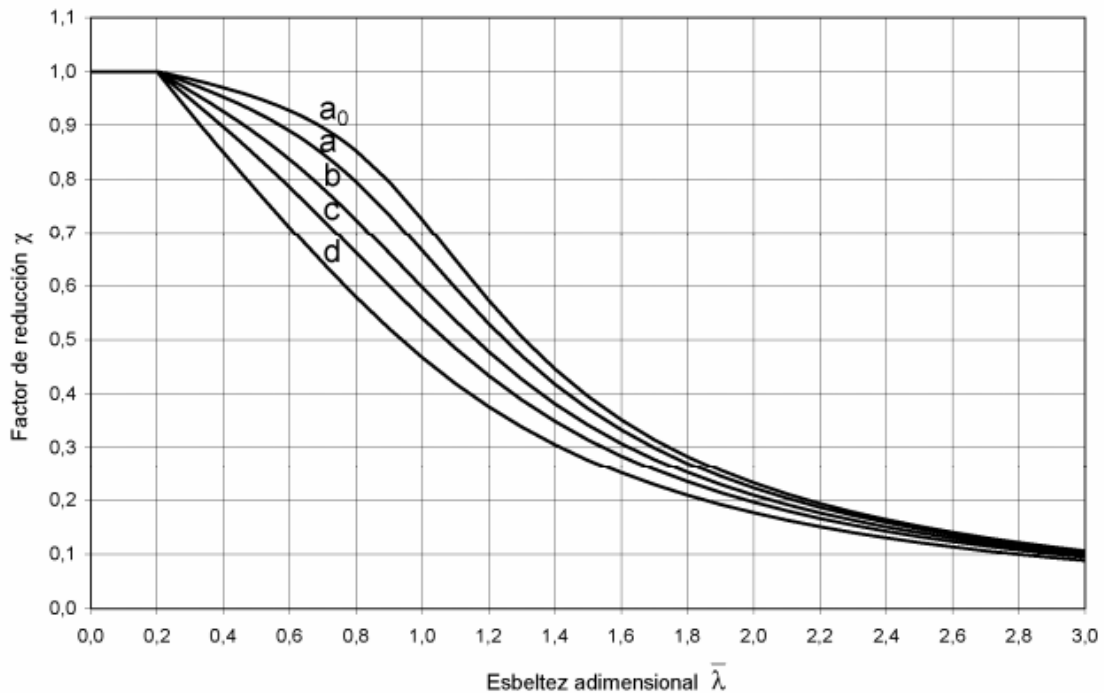
On  $E \cdot I$  és la rigidesa a flexió de l'element en el pla de vinclament per flexió considerat i  $L_{cr}$  la longitud de vinclament considerada ( $L_{cr} = K \cdot L$ ). El paràmetre  $K$  adopta diferents valors en funció de les condicions de contorn de la peça d'estudi. A la figura 2.7 es presenten els coeficients de vinclaments per als casos canònics.

$$L_{cr} = K \cdot L$$



**Figura 2.7: Longitud de vinclament per als casos canònics**

Les corbes europees de vinclament s'obtenen a partir de la resolució de l'equació diferencial que descriu la curvatura d'una biga sotmesa a compressió i flexió. En aquesta expressió es tenen en compte les tensions residuals que es produeixen en el procés de fabricació de l'acer. La resolució d'aquesta equació permet unificar criteris i classificar les peces en diferents corbes. Segons el tipus de secció que es tingui, es consideren unes corbes i unes altres. A continuació es presenten a la figura 2.8 les diferents corbes europees de vinclament i la classificació de secció que s'utilitzen en aquest treball, que es troba a la taula 2.2.



**Figura 2.8: Corbes Europees de vinclament**

**Taula 2.2: Classificació per a les corbes Europees de vinclament per a seccions tubulars.**

Sección transversal		Límites	Pandeo alrededor del eje	Curva de pandeo	
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Secciones huecas		Acabados en caliente	cualquiera	a	a <sub>0</sub>
		Conformados en frío	cualquiera	c	c

L'expressió que defineix la norma per a l'obtenció de  $\chi$  és la [2-15].

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{on } \chi \leq 1 \quad [2-15]$$

El paràmetre  $\Phi$  s'obté a partir de la esveltesa adimensional i les corbes de vinclament, segons la expressió [2-16].

$$\Phi = 0.5 \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad [2-16]$$

En resum, segons la norma, la comprovació a vinclament que s'ha de realitzar per a una peça com són les d'aquest cas d'estudi, consisteix en reduir la resistència a compressió a partir del paràmetre  $\chi$ , que té en compte la geometria de la peça i el tipus d'acer utilitzat.

### 2.5.2. Interacció Axil –Flector

En el cas que el col·lapse de l'estructura causi fallida per vinclament de la peça, les normatives consideren que tot tipus de secció ha de complir l'expressió [2-17].

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \cdot \frac{c_M \cdot M_{Ed,max}}{\frac{M_{c,Rd}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad [2-17]$$

On  $N_{b,Rd}$  i  $N_{cr}$  són els valors de l'axil crític de vinclament i l'axil crític d'Euler respectivament i estan definits en el apartat 2.5 i  $M_{Ed,max}$  és el valor del moment flector màxim.

El coeficient  $c_M$  és un paràmetre que té en compte el fet que els augments del moment flector degut a l'axil i el moment flector no estan vinculats i que els moments màxims deguts al flector i al moment de segon ordre (moment provocat per l'excentricitat de l'esforç axil) no es situen necessàriament en el mateix lloc. Tenint en compte que els elements d'estudi són traslacional, podem adoptar  $c_M=0,9$  segons el mètode Austríac – Alemany.

La corba que defineix aquest comportament depèn de la geometria global de la peça, per tant cada peça a estudi té una corba diferent.

### 3. Càlcul Piles

#### 3.1. Dimensionament

Amb l'objectiu de cobrir els diferents paràmetres que poden condicionar el comportament de les piles de ponts integrals i ajustar-nos a les dimensions més utilitzades, s'han realitzat càlculs per a 7 peces de secció tubular. Les peces 1, 2 i 3 tenen un diàmetre mig d'1 metre, la seva longitud és de 10 metres i els espessors són de 20, 40 i 60 mil·límetres respectivament. Les peces 4, 5, 6 i 7 tenen un diàmetre mig de dos metres, però la longitud de les peces 4 i 5 és de 10 metres, en canvi les peces 6 i 7 tenen un longitud de 20 metres.

S'ha considerat un tipus d'acer S 355, segons la norma EAE, que té un límit elàstic de 355 N/mm<sup>2</sup> i un límit últim de 510 N/mm<sup>2</sup>.

A continuació es presenten les expressions utilitzades per a la realització de càlculs referents a les peces sota estudi:

Els paràmetres bàsics de qualsevol secció són l'àrea (A), la inèrcia (I) i el radi de gir (i). Aquests paràmetres són indicadors de la capacitat resistent de la secció. Per a seccions circulars buides, les expressions a utilitzar per obtenir aquests valors són les [2-18], [2-19] i [2-20].

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad [2-18]$$

$$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) \quad [2-19]$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad [2-20]$$

On D correspon al diàmetre exterior i d al diàmetre interior.

Un altre paràmetre important de la peça és l'esveltesa ( $\lambda$ ). Aquest paràmetre és un indicador dels problemes que pot patir una estructura en relació als efectes de segon ordre, és a dir, a vinclament. L'expressió [2-21] s'ha utilitzat per al càlcul de l'esveltesa.

$$\lambda = \frac{l}{i} \quad [2-21]$$

On l és la longitud de la peça.

Cal remarcar que les seccions circulars tenen la peculiaritat que tenen un eix radial de simetria, per tant, totes les direccions són direccions principals d'inèrcia, el que provoca que no s'ha de considerar la descomposició d'esforços en els diferents eixos de inèrcia en els càlcul de resistència seccional, i el radi de gir es constant per a qualsevol eix, el que implica que només s'ha de considerar un eix de vinclament a l'hora de realitzar els càlculs pels efectes de segon ordre.

Tots els valors dels anteriors paràmetres, estan recollits a la taula 3.1

També s'ha realitzat la classificació seccional d'aquestes segons la norma. A la taula 3.2, s'ha recollit aquesta classificació.



Taula 3.1: Paràmetres geomètrics de la secció i esvelteses de les diferents peces

Peça	Diàmetre mig (mm)	Espressor (mm)	Longitud (mm)	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	D (mm)	d	Àrea (mm <sup>2</sup> )	Inèrcia (mm <sup>4</sup> )	i (mm)	$\lambda$
1	1.000,00	20,00	10.000,00	355,00	1.020,00	980,00	62.831,85	7,86E+09	353,62409	19,80
2	1.000,00	40,00	10.000,00	355,00	1.040,00	960,00	125.663,71	1,57E+10	353,83612	19,78
3	1.000,00	60,00	10.000,00	355,00	1.060,00	940,00	188.495,56	2,36E+10	354,18921	19,76
4	2.000,00	40,00	10.000,00	355,00	2.040,00	1.960,00	251.327,41	1,26E+11	707,24819	9,90
5	2.000,00	60,00	10.000,00	355,00	2.060,00	1.940,00	376.991,12	1,89E+11	707,42491	9,90
6	2.000,00	40,00	20.000,00	355,00	2.040,00	1.960,00	251.327,41	1,26E+11	707,24819	19,80
7	2.000,00	60,00	20.000,00	355,00	2.060,00	1.940,00	376.991,12	1,89E+11	707,42491	19,79

Taula 3.2 : Classificació de la secció de les diferents peces

Peça	Diàmetre mig (mm)	Espressor (mm)	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	dmig/t	$\epsilon$	$\epsilon^2$	Classe
1	1.000,00	20,00	355,00	50,00	0,81	0,66	Classe 3
2	1.000,00	40,00	355,00	25,00	0,81	0,66	Classe 1
3	1.000,00	60,00	355,00	16,67	0,81	0,66	Classe 1
4	2.000,00	40,00	355,00	50,00	0,81	0,66	Classe 3
5	2.000,00	60,00	355,00	33,33	0,81	0,66	Classe 2
6	2.000,00	40,00	355,00	50,00	0,81	0,66	Classe 3
7	2.000,00	60,00	355,00	33,33	0,81	0,66	Classe 2

Com es pot observar en les taules 3.1 i 3.2, les àrees de les diferents peces queden acotades entre  $630 \text{ cm}^2$  i  $3770 \text{ cm}^2$ . Aquests són valors molt alts per als càlculs de la resistència a compressió. Es pot comprovar que l'àrea de la peça 2 és el doble que la de la peça 1 i que l'àrea de la peça 3 és el triple que la de la peça 1. Igualment, s'observa que l'àrea de les peces 4 i 6 és el doble que la de la peça 2, i per tant el quàdruple que la de la peça 1; l'àrea de les peces 5 i 7 és el doble que la de la peça 3 i per tant, el sèxtuple que la de la peça 1.

La inèrcia, paràmetre principal pel càlcul de la resistència a flexió, queda limitada entre els valors  $7,86 \cdot 10^5 \text{ cm}^4$  i  $1,90 \cdot 10^7 \text{ cm}^4$ . La relació d'inèrcies entre les diferents peces és idèntica a la relació que existeix entre els diferents valors de l'àrea.

El radi de gir té un valor aproximat de 354 mm per a les peces de diàmetre 1 metre (peces 1, 2 i 3) i 707 mm per a les peces de diàmetre 2 metres (peces 4, 5, 6 i 7). Per tant, és evident que el radi de gir per les peces 4, 5, 6 i 7 és el doble que el de les peces 1, 2 i 3 i això és provocat perquè el diàmetre de les peces 4, 5, 6 i 7 és el doble que el de les peces 1, 2 i 3.

L'esveltesa té un valor de 19,8 per a les peces de diàmetre 1 metre i longitud 10 metres i les peces de diàmetre 2 metres i longitud 20 metres. Per a les peces de diàmetre 2 metres i longitud 10 metres l'esveltesa té un valor de 9,9. S'observa que l'esveltesa de les peces 1, 2, 3, 6 i 7 és el doble que l'esveltesa de les peces 4 i 5, i això és degut a que la relació entre el cantell màxim de la peça i la seva alçada en les peces 1, 2, 3, 6 i 7 és el doble que la de les peces 4 i 5.

Pel que es refereix a la classificació seccional de les peces, les peces 2 i 3 són classe 1 perquè el seu valor de  $d_{\text{mig}}/t$  es inferior al valor límit de  $50 \cdot \epsilon^2$ . Les peces 5 i 7 pertanyen a la classe 2, perquè el seu valor de  $d_{\text{mig}}/t$  és inferior al valor límit de  $70 \cdot \epsilon^2$ . Les peces 1, 4 i 6 pertanyen a la classe 3, perquè el seu valor de  $d_{\text{mig}}/t$  és inferior al valor límit de  $90 \cdot \epsilon^2$ . Això implica que, per al càlcul de la resistència a flexió les peces 2, 3, 5 i 7 s'utilitzaran les mateixes expressions, relacionades amb els límits últims, i les peces 1, 4 i 6 utilitzaran unes altres, relacionades amb els límits elàstics.

### 3.2. Determinació d'esforços

El càlcul dels esforços als que es veuen sotmeses les piles objecte d'estudi es realitzarà mitjançant la modelització de la pila d'un pont integral davant esforços de caràcter longitudinal. Per realitzar aquesta modelització es faran dos anàlisi amb el programa de càlcul per elements finits Abaqus. El primer anàlisi consistirà en l'obtenció dels valors màxims a compressió en un càlcul a vinclament de les diferents peces. Aquest procés és conegut com anàlisi de Buckle. El segon anàlisi que es realitzarà serà la determinació de l'esforç màxim horitzontal i el desplaçament que produirà amb diferents valors de càrrega a compressió, en un anàlisi no lineal intentant simular els esforços longitudinals que es poden produir en servei. Tots els valors necessaris per poder realitzar aquests càlculs es determinaran mitjançant les indicacions de la norma comentats en els apartats 2 i 3 d'aquest treball.

A la taula 3.3 es presenten els valors de les resistències de càlcul obtingudes a partir de la teoria de resistència de materials per a les diferents peces que s'han considerat en el present treball.

**Taula 3.3: Valors de les resistències de les diferents peces.**

Peça	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$W_{pl}$ (mm <sup>3</sup> )	$W_{el}$ (mm <sup>3</sup> )	$N_{c,Rd}$ (kN)	$M_{c,Rd}$ (kN·m)	$\lambda_{adim}$	$\varphi$	$\chi$	$N_{b,Rd}$ (kN)
1	355,00	2,00E+07	1,54E+07	22.305,31	5.469,17	0,26	0,55	0,97	21.635,52
2	355,00	4,00E+07	3,03E+07	44.610,62	14.207,57	0,26	0,55	0,97	43.274,55
3	355,00	6,01E+07	4,46E+07	66.915,92	21.325,56	0,26	0,55	0,97	64.920,60
4	355,00	1,60E+08	1,23E+08	89.221,23	43.753,39	0,13	0,49	1	89.221,23
5	355,00	2,40E+08	1,83E+08	133.831,85	85.225,56	0,13	0,49	1	133.831,85
6	355,00	1,60E+08	1,23E+08	89.221,23	43.753,39	0,26	0,55	0,97	86.542,08
7	355,00	2,40E+08	1,83E+08	133.831,85	85.225,56	0,26	0,55	0,97	129.817,51

Si s'observa els valors obtinguts per a la resistència a compressió de la taula 3.3, es veu que la relació entre les diferents peces és la mateixa que la relació amb les àrees. Si s'analitza l'expressió que s'utilitza per a l'obtenció dels diferents valors, es veu que l'únic paràmetre que varia és l'àrea. La resta de paràmetres són constants.

Observant els valors obtinguts per a la resistència a flexió, es pot comprovar que la relació entre els diferents valors no és tan directa com en el cas de la resistència a compressió. Això és degut a que les expressions per obtenir els valors de la resistència a flexió depenen de la classificació seccional que tingui cada peça.

Pel que fa als valors obtinguts en la resistència a vinclament, es pot observar que els paràmetres  $\chi$  de les diferents peces són molt propers a 1 o valen 1. Això implica que la resistència última a compressió no es veu gaire reduïda per efectes d'inestabilitat global.

### 3.2.1. Model numèric

La existència actualment de potents models d'anàlisi basats en el mètode d'elements finits, permet reproduir comportaments estructurals complexos amb equacions constitutives no lineals dels materials, incloent no linealitats geomètriques.

Per realitzar la modelització de les diferents peces s'ha utilitzat el programa de càlcul per elements finits Abaqus desenvolupat per HKS Inc a Rhode Island als Estats Units d'Amèrica . Aquest programa inclou un potent modelitzador (preprocés) i visualitzador (postprocés) pels diferents anàlisis. L'Abaqus realitza esquemes d'integració explícits per resoldre anàlisis no lineals dinàmicament transitoris i quasi estàtics.

El model numèric d'Abaqus considera els efectes de la no linealitat del material provocats pel complex comportament de l'acer, considerant l'equació constitutiva real de l'acer utilitzat, i considera també els efectes de la no linealitat geomètrica provocada per la influència dels grans desplaçaments en equilibre l'estructura.

Tal com s'ha comentat a la introducció, aquest treball s'emmarca dins d'un Projecte de Recerca, finançat pel Ministerio de Fomento, titulat "Seguridad y funcionalidad de los puentes integrales de ferrocarril frente acciones accidentales. Investigación para el establecimiento de criterios de diseño y construcción" en el que treballen altres persones. Els models utilitzats per als anàlisis han estat subministrats per altres

investigadors mentre que els càlculs i el posterior anàlisi de resultats s'han realitzat totalment en el treball.

S'han utilitzat 3 models diferents per realitzar les 7 peces. S'ha utilitzat un model tridimensional de secció circular buida de 1 metre de diàmetre i 10 metres de longitud per a les peces 1, 2 i 3. El segon model tridimensional, de secció circular buida de 2 metres de diàmetre i 10 metres de longitud, s'ha utilitzat per les peces 4 i 5. Les peces 6 i 7 s'han calculat el tercer model tridimensional, de secció circular buida de 2 metres de diàmetre i 20 metres de longitud. Per les peces amb el mateix model només calia canviar els espessors.

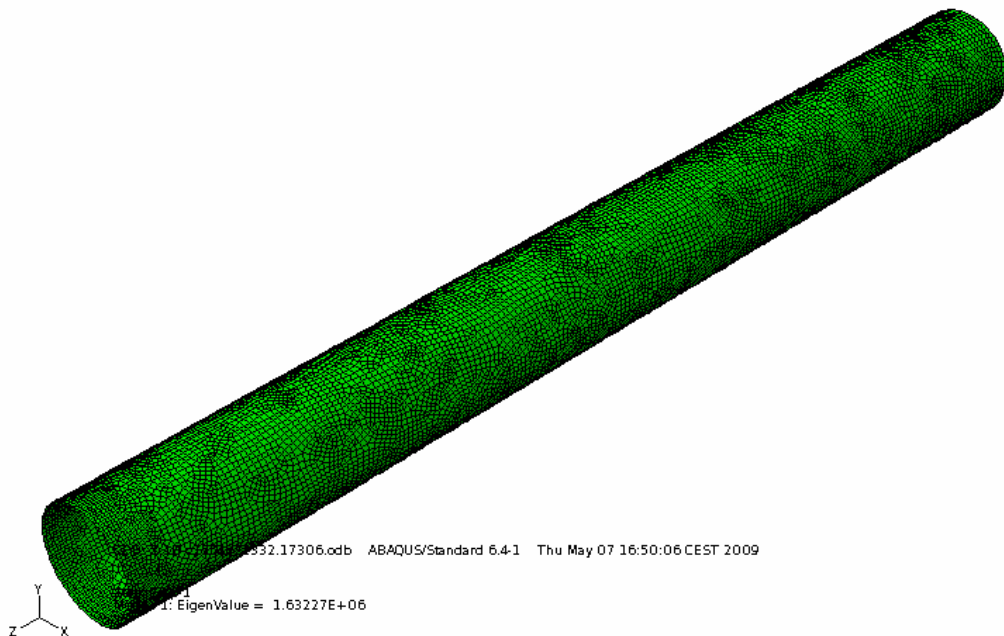
#### *Model 1:*

El model 1 està format per 18474 elements tipus node que formaran els punts la xarxa d'elements finits. Els número d'elements finits tipus S3 és de 661 i els de tipus S4R és 18709. Aquests dos últims formaran els elements finits per realitzar els anàlisis.

S'ha definit el material pel nom acer, tindrà un caràcter elàstic i el seu mòdul d'elasticitat és de  $210000 \text{ N/mm}^2$  i el coeficient de Poisson de 0.3.

Pel que fa a les condicions de contorn, s'han considerat impeditos els moviments i girs d'un costat (costat en contacte amb el terreny). De l'altre costat s'han considerat impeditos els girs en totes les direccions i els moviments en una direcció (costat en contacte amb el tauler permetent l'escurçament de la peça a compressió i els moviments longitudinals del tauler).

A la figura 3.1 es mostra una representació gràfica del model 1 obtingut a partir del programa Abaqus.



**Figura 3.1: Representació gràfica del model numèric 1 obtinguda amb el programa Abaqus**

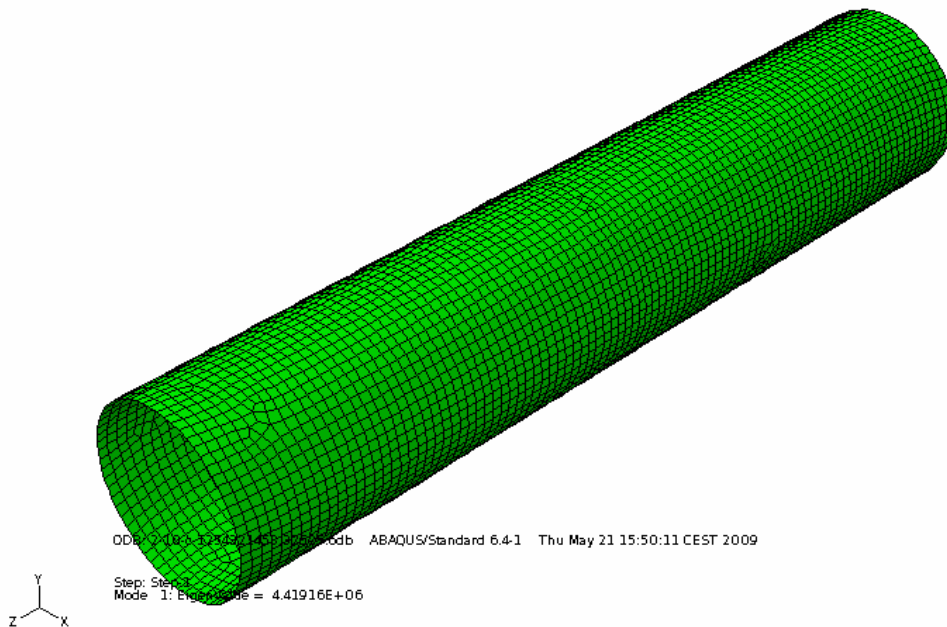
### *Model 2:*

El model 2 està format per 5857 elements tipus node que formaran els punts la xarxa d'elements finits. Els número d'elements finits tipus S3 és de 11 i els de tipus S4R és 5799. Aquests dos últims formaran els elements finits per realitzar els anàlisis.

S'ha definit el material pel nom acer, tindrà un caràcter elàstic i el seu mòdul d'elasticitat és de  $210000 \text{ N/mm}^2$  i el coeficient de Poisson de 0.3.

Pel que fa a les condicions de contorn, s'han considerat impeditos els moviments i girs d'un costat (costat en contacte amb el terreny). De l'altre costat s'han considerat impeditos els girs en totes les direccions i els moviments en una direcció (costat en contacte amb el tauler permetent l'escurçament de la peça a compressió i els moviments longitudinals del tauler).

A la figura 3.2 es mostra una representació gràfica del model 2 obtingut a partir del programa Abaqus.



**Figura 3.2: Representació gràfica del model 2 obtingut a partir del programa Abaqus.**

### *Model 3:*

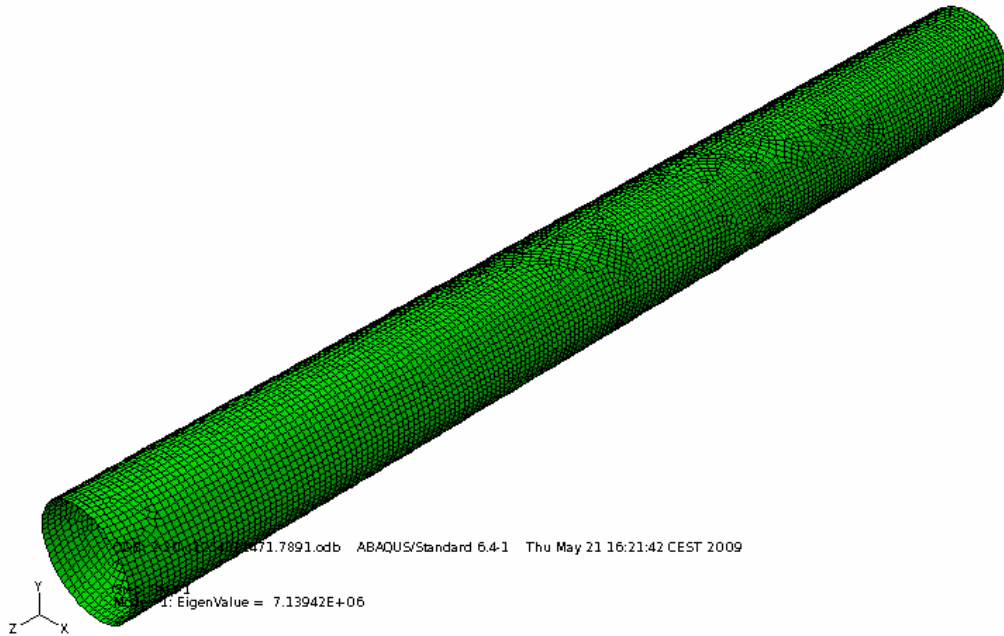
El model 3 està format per 12098 elements tipus node que formaran els punts la xarxa d'elements finits. Els número d'elements finits tipus S3 és de 157 i els de tipus S4R és 12113. Aquests dos últims formaran els elements finits per realitzar els anàlisis.

S'ha definit el material pel nom acer, tindrà un caràcter elàstic i el seu mòdul d'elasticitat és de  $210000 \text{ N/mm}^2$  i el coeficient de Poisson de 0.3.

Pel que fa a les condicions de contorn, s'han considerat impeditos els moviments i girs d'un costat (costat en contacte amb el terreny). De l'altre costat s'han considerat impeditos els girs en totes les direccions i els moviments en una direcció (costat en

contacte amb el tauler permetent l'escurçament de la peça a compressió i els moviments longitudinals del tauler).

A la figura 3.3 es mostra una representació gràfica del model 3 obtingut a partir del programa Abaqus.



**Figura 3.3: Representació gràfica del model 3 obtingut a partir del programa Abaqus.**

### 3.2.2. Anàlisi de Buckle

L'anàlisi de Buckle permet obtenir els valors de l'axil de compressió crític en un anàlisi a vinclament. Aquest càlcul és necessari per veure quines són les inestabilitats associades al comportament de la peça (abonyegament i/o vinclament) i comparar-lo amb la càrrega crítica d'Euler (Paràmetre teòric utilitzat pels anàlisis a vinclament).

El procés que segueix el programa Abaqus per realitzar aquest càlcul, consisteix en realitzar un anàlisi d'autovalors de la matriu de rigidesa de la peça. L'obtenció dels diferents autovalors permet l'obtenció de la càrrega crítica de bifurcació per a cada mode de vinclament possible.

En aquest anàlisi no cal introduir dades d'entrada no geomètriques, ja que les dades d'entrada són la pròpia geometria de la peça.

Per a l'obtenció de resultats, s'ha de considerar que el valor que ens dona el programa s'ha de multiplicar pel número de nodes situats al contorn carregat d'un dels extrems de la peça. Els tres models tenen un número diferent de nodes:

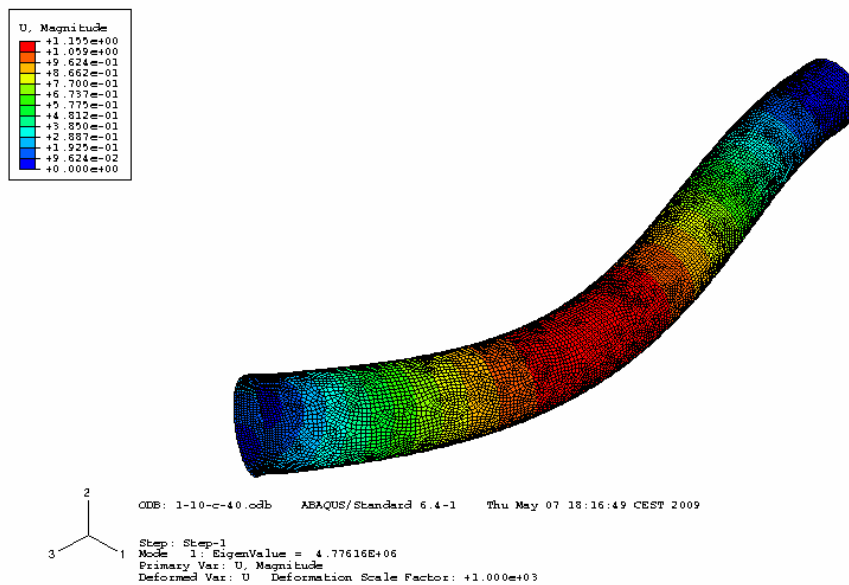
- El model 1 té 128 nodes a l'extrem carregat.
- Els models 2 i 3 tenen 64 nodes a l'extrem carregat.

Per tant, el valor obtingut del programa s'ha de multiplicar pel número de nodes del contorn de l'extrem carregat, per obtenir el valor de l'axil a compressió crític d'Euler.

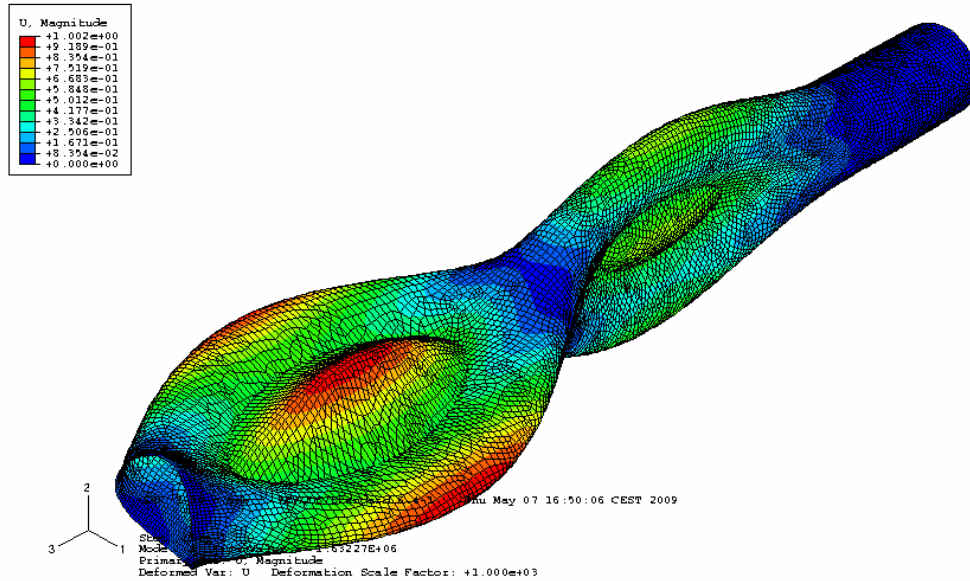
Un cop s'obté aquest resultat, aquest valor s'ha de comparar amb el resultat teòric de la càrrega crítica d'Euler, per tal de comparar si el model numèric calculat amb el programa Abaqus és semblant al model teòric idealitzat per la norma. D'aquesta manera, s'obtingueran les longituds crítiques teòriques obtingudes a partir de l'axil crític que dona el programa Abaqus ( $l_{cr,teorica,Abaqus}$ ), com es presenta a l'expressió [3-1].

$$l_{cr,teorica,Abaqus} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI}{N_{cr,Abaqus}}} \quad [3-1]$$

A continuació es presenten les figures 3.4 i 3.5, que representen els diferents resultats que es poden obtenir per a l'anàlisi de Buckle segons el programa Abaqus. La figura 3.4 representa el cas de inestabilitat global i la figura 3.5 representa el cas d'inestabilitat local.



**Figura 3.4: Representació gràfica de la solució de inestabilitat global obtinguda en el programa Abaqus**



**Figura 3.5: Representació gràfica de la solució de inestabilitat local obtinguda en el programa Abaqus**

### 3.2.3. Anàlisi no lineal

Per a realitzar l'anàlisi no lineal, es considera que en configuracions estables amb no linealitat del material, el mètode utilitzat és el Newton – Raphson. Aquest mètode inclou l'efecte de variació de rigidesa del material, com succeeix en casos no lineals. El càlcul realitzat pel programa Abaqus consisteix en la solució del sistema d'equacions:

$$K \cdot a = f$$

On K és la matriu de rigidesa de la peça, a és el vector de desplaçament nodals i f el vector de forces nodals. K depèn del camp de valors dels desplaçaments.

L'anàlisi no lineal permet obtenir les gràfiques de força – desplaçament (V - d), per tal de discretitzar el comportament de la pila dúctil amb diferents condicions de càrrega. S'han utilitzat els models d'elements finits definits en l'Anàlisi de Buckle.

El procés que realitza el programa per realitzar aquest càlcul és el següent:

- Primer carrega la peça amb un esforç a compressió introduït per l'usuari, com a sol·licitacions prèvies, permetent l'escurçament de la peça en direcció axial.
- Després comença a desplaçar el costat que no té impedit el moviment longitudinal, simulant els moviments longitudinals que es podrien produir deguts a frenada i moviments imposats, i calcula la força necessària per produir aquest moviment. D'aquesta manera, el programa crea un conjunt de dades, agrupades en parelles, que després serviran per dibuixar les gràfiques de força – desplaçament.

Per realitzar aquest càlcul, s'han creat 5 models diferents per cada peça, de tal manera que cada model té una càrrega a compressió diferent (0%, 20%, 40%, 60% i 80% de la resistència màxima a compressió de la pila) i així poder avaluar el



comportament de la pila dúctil en diferents casos de càrrega. Per tant, en total s'han creat 35 models de càlcul.

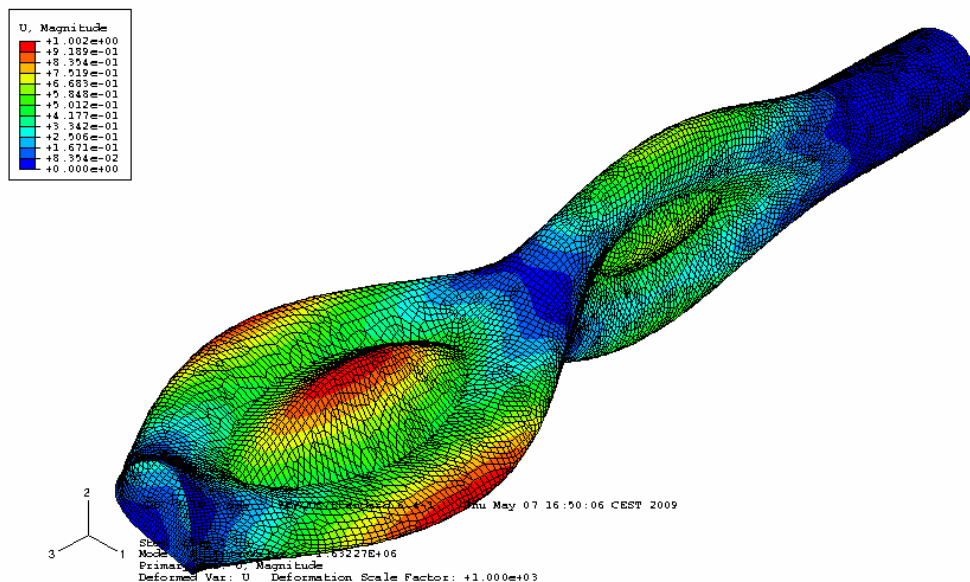
Per introduir les dades dins del model de càlcul, s'ha de considerar el mateix que en l'obtenció de resultats en l'anàlisi de Buckle.

### 3.3. Resultats

#### 3.3.1. Anàlisi de Buckle

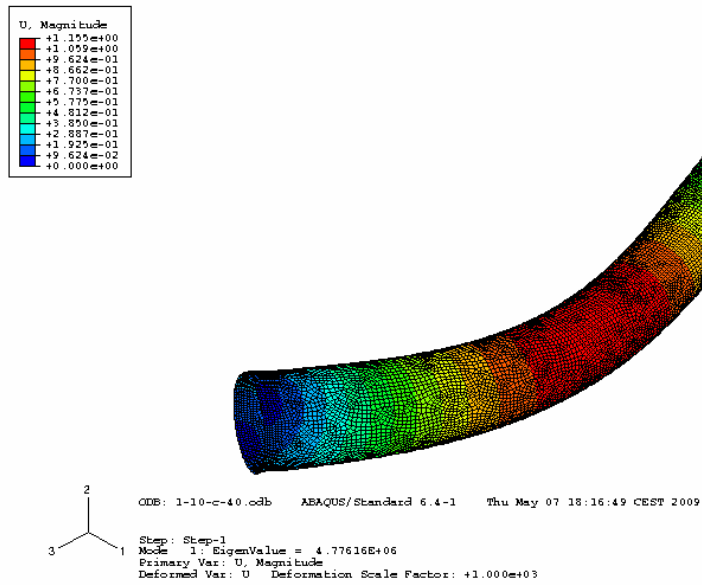
A continuació es presenten els resultats de l'axil de compressió crític d'Euler, obtinguts a partir de l'anàlisi de Buckle realitzat amb el programa Abaqus, acompanyats de les deformades de les peces obtingudes.

Peça 1:  
 $N_{cr,Abaqus} = 208.930,56 \text{ kN}$



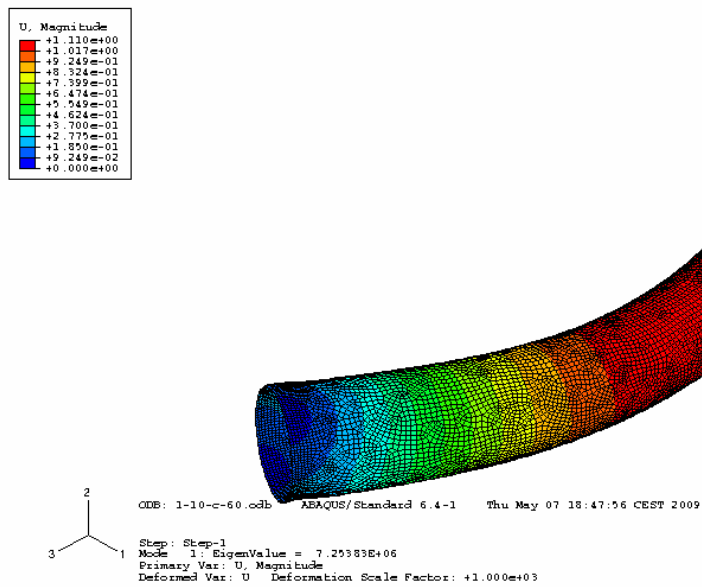
**Figura 3.6: Representació gràfica de la solució obtinguda per a la Peça 1 en l'anàlisi de Buckle.**

*Peça 2:*  
 $N_{cr, Abaqus} = 611.348,48 \text{ kN}$



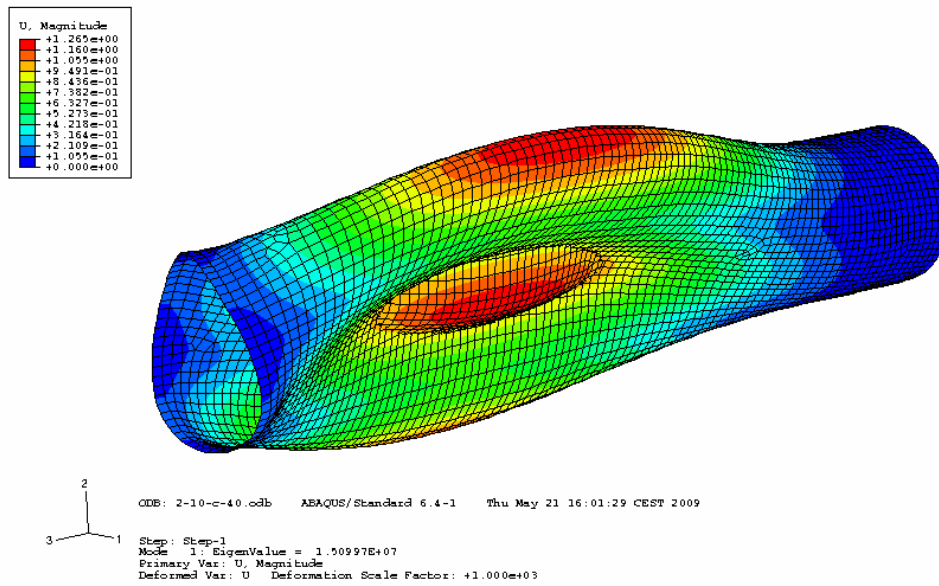
**Figura 3.7: Representació gràfica de la solució obtinguda per a la Peça 2 en l'anàlisi de Buckle.**

*Peça 3:*  
 $N_{cr, Abaqus} = 928.490,24 \text{ kN}$



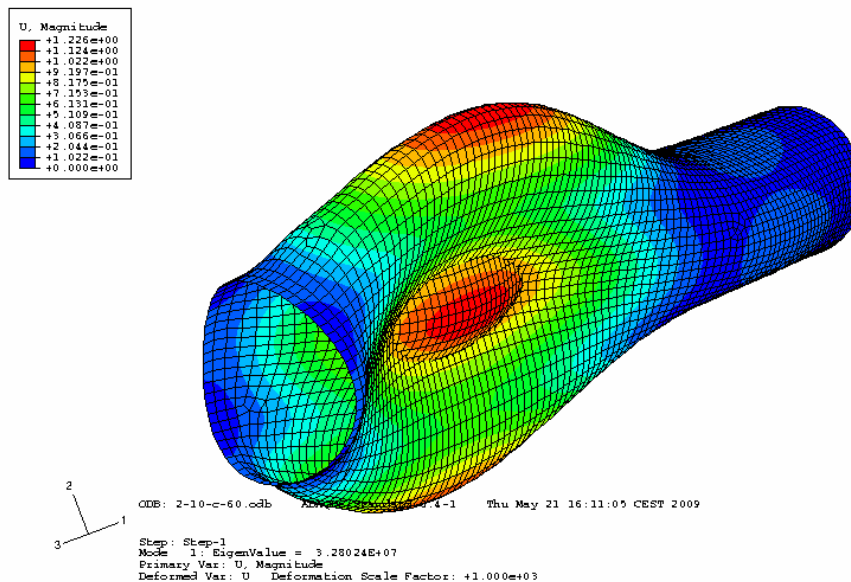
**Figura 3.8: Representació gràfica de la solució obtinguda per a la Peça 3 en l'anàlisi de Buckle.**

*Peça 4:*  
 $N_{cr,Abaqus} = 966.380,80 \text{ kN}$



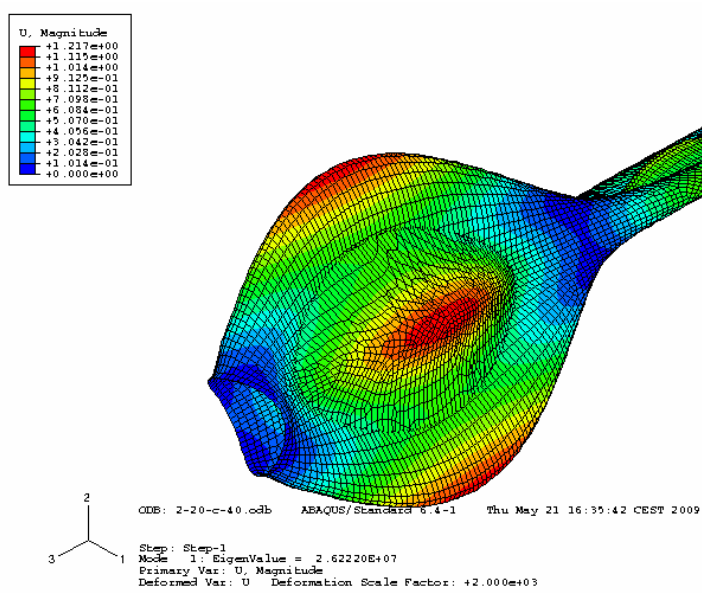
**Figura 3.9: Representació gràfica de la solució obtinguda per a la Peça 4 en l'anàlisi de Buckle.**

*Peça 5:*  
 $N_{cr,Abaqus} = 2.099.353,60 \text{ kN}$



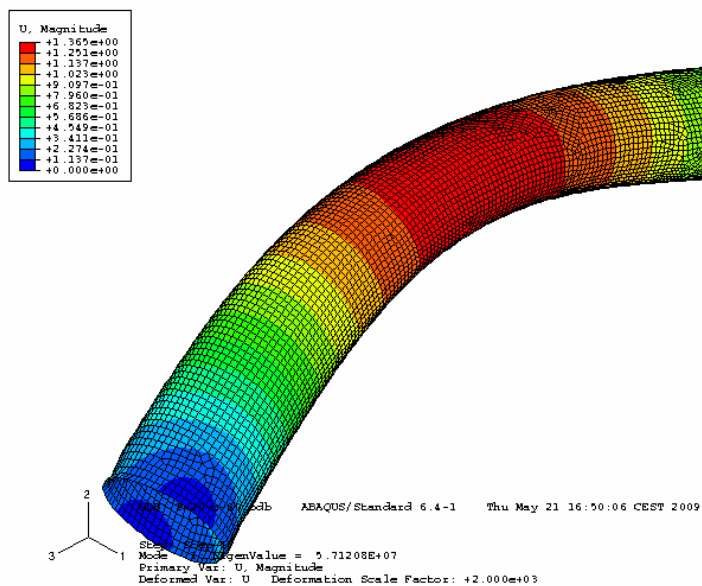
**Figura 3.10: Representació gràfica de la solució obtinguda per a la Peça 5 en l'anàlisi de Buckle.**

*Peça 6:*  
 $N_{cr,Abaqus} = 1.678.208,00 \text{ kN}$



**Figura 3.11: Representació gràfica de la solució obtinguda per a la Peça 6 en l'anàlisi de Buckle.**

*Peça 7:*  
 $N_{cr,Abaqus} = 3.655.731,20 \text{ kN}$



**Figura 3.12: Representació gràfica de la solució obtinguda per a la Peça 7 en l'anàlisi de Buckle.**

Com es pot observar en els resultats obtinguts, hi ha un total de 3 peces que tenen problemes d'inestabilitat global i 4 peces que tenen problemes d'inestabilitat local.

A continuació es presenta la taula 3.4 on es troben els valors obtinguts a partir de l'anàlisi de Buckle

**Taula 3.4: Valors obtinguts a partir de l'anàlisi de Buckle amb el programa Abaqus**

Peça	$N_{cr,e}$ (kN)	$N_{cr,abacus}$ (kN)	$N_{cr,abacus}/N_{cr,e}$	$L_{cr,teorica,abacus}$	k	$\chi$	$N_{b,Rd,abacus}$ (kN)	$N_{b,Rd}$ (kN)	$N_{b,Rd,abacus} / N_{b,Rd}$
1	332.342,99	208.930,56	0,63	8.828,57	0,88	0,9355	20.865,72	21.635,52	0,96
2	665.483,29	611.348,48	0,92	7.303,35	0,73	0,9644	43.020,35	43.274,55	0,99
3	1.000.218,19	928.490,24	0,93	7.265,35	0,73	0,9652	64.587,41	64.920,60	0,99
4	5.317.487,86	966.380,80	0,18	16.420,15	1,64	0,9472	84.508,76	89.221,23	0,95
5	7.980.218,31	2.099.353,60	0,26	13.647,80	1,36	0,9733	130.260,20	133.831,85	0,97
6	1.329.371,97	428.561,65	0,32	24.657,25	1,23	0,8671	77.365,82	86.542,08	0,89
7	1.995.054,58	1.825.124,37	0,91	14.637,24	0,73	0,964	129.016,20	129.817,51	0,99

Segons els valors representats en la taula 3.4 i suposant que els resultats obtinguts a partir de l'Abaqus els puguem assumir com la realitat, observem que l'axil de compressió crític d'Euler està per sobre del obtingut amb Abaqus. Malgrat això, en alguns casos, com succeeix en les peces 2, 3 i 7, el valor obtingut és molt semblant al valor teòric. En les peces 1, 4, 5 i 6 el valor obtingut es considera inferior al valor teòric.

Pel que fa a la longitud crítica teòrica obtinguda a partir dels resultats de l'Abaqus que es presenten en la taula 3.4, en les peces 1, 4, 5 i 6 la longitud crítica obtinguda és superior a la longitud crítica teòrica que marquen els casos canònics. En la resta de casos la longitud crítica obtinguda és molt similar a la longitud crítica teòrica.

Si obtenim el valor resistent de càlcul  $N_{b,Rd}$  a partir de les longituds crítiques obtingudes a partir de l'anàlisi de Buckle ( $N_{b,Rd,abacus}$ ), s'observa que en general no disminueix considerablement el valor donat per les normatives. Cal remarcar que en les peces 2, 3 i 7 el valor obtingut és el 99 % del valor teòric.

El comportament de les peces 1,4,5 i 6 es veu a les figures està afectat per fenòmens d'instabilitat local. Per això els valors de  $N_{cr,e}$  (Axil crític d'Euler de vinclament global) només coincideix amb el de Abaqus a les peces 2,3 i 7.

**Taula 3.5: Comparació dels valors obtinguts en l'anàlisi de Buckle i tipus d'instabilitat obtinguda en el anàlisi de Buckle**

Peça	$N_{cr,abacus}/N_{cr,teorica}$	Classe	$\lambda$	Vinclament local	Vinclament global
1	0,63	Classe 3	19,80	v	
2	0,92	Classe 1	19,78		v
3	0,93	Classe 1	19,76		v
4	0,18	Classe 3	9,90	v	
5	0,26	Classe 2	9,90	v	
6	0,32	Classe 3	19,80	v	
7	0,91	Classe 2	19,79		v

Segons la taula 3.5, basada en les dades obtingudes de la norma i valors obtinguts de l'anàlisi de Buckle, observem que les seccions de classe 1 no pateixen problemes d'instabilitat local en cap dels casos. També s'observa que les seccions de classe 3 sempre pateixen problemes d'instabilitat local. Les seccions de classe 2 menys

esveltes sofreixen problemes d'inestabilitat local, en canvi les més esveltes sofreixen inestabilitat global.

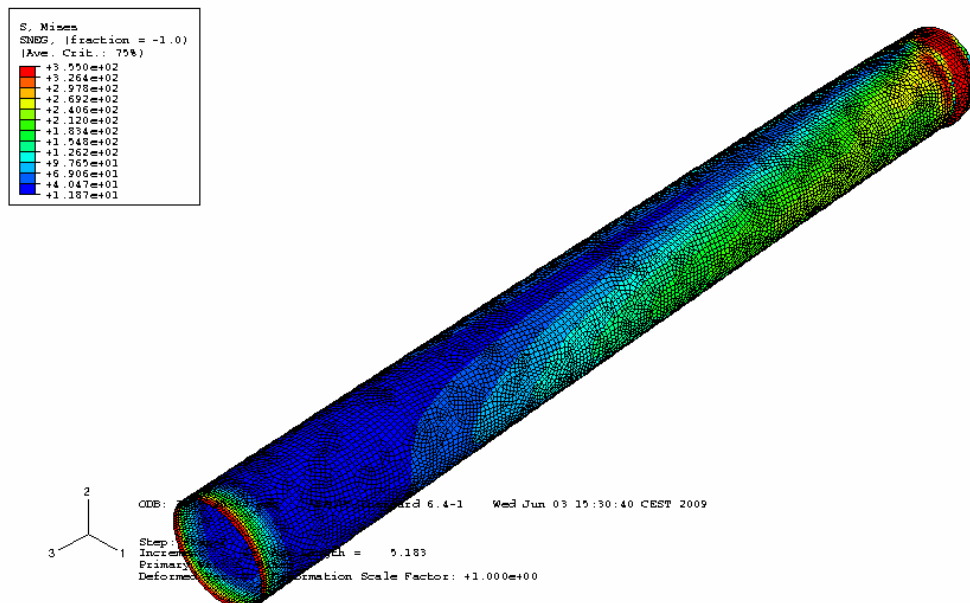
Pel que fa als valors resistents, les seccions de classe 1 tenen valors similars als límits teòrics. Els valors obtinguts per les seccions de classe 3 són considerablement inferiors als valors teòrics. De les seccions de classe 2, es pot observar que per seccions menys esveltes, com la peça 5, els paràmetres teòrics queden molt per sota dels valors obtinguts mitjançant el programa Abaqus. Per les més esveltes, com la peça 7, el valor teòric subestima el valor obtingut amb l'Abaqus.

### 3.3.2. Anàlisi no lineal

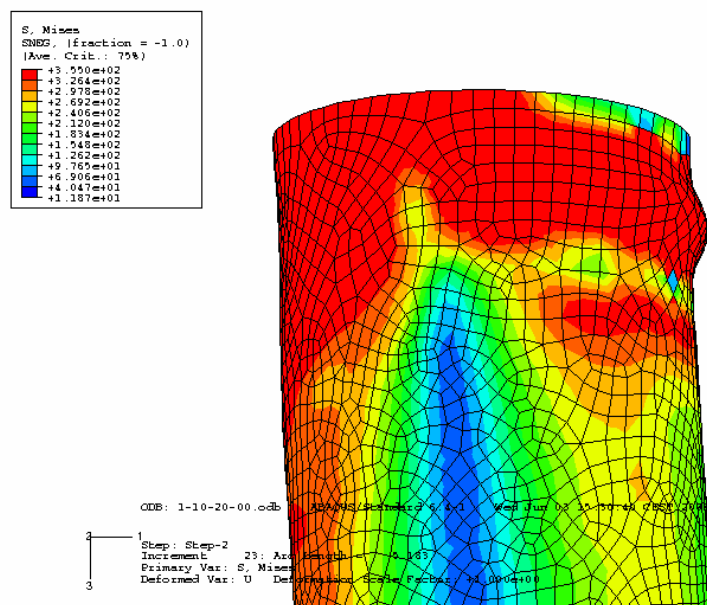
A continuació es presenten els resultats obtinguts en l'anàlisi no lineal fet amb el programa Abaqus, de tres de les peces considerades representatives de la seva classe. Aquestes peces són la Peça 1, pertanyent a la classe 3, la Peça 2, pertanyent a la classe 1 i la Peça 5 que pertany a la classe 2. De cada peça, es presenten les deformades obtingudes en cada cas de càrrega per a cada peça, després hi ha la gràfica  $V_{ed} - d$  que descriu el comportament de cada peça en cada cas de càrrega.

Els resultats obtinguts per a la resta de peces es troben en el apartat 7, on a més a més s'inclouen les taules amb els valors que formen les diferents gràfiques del comportament de les peces.

*Peça 1:*  
Càrrega del 0 %:

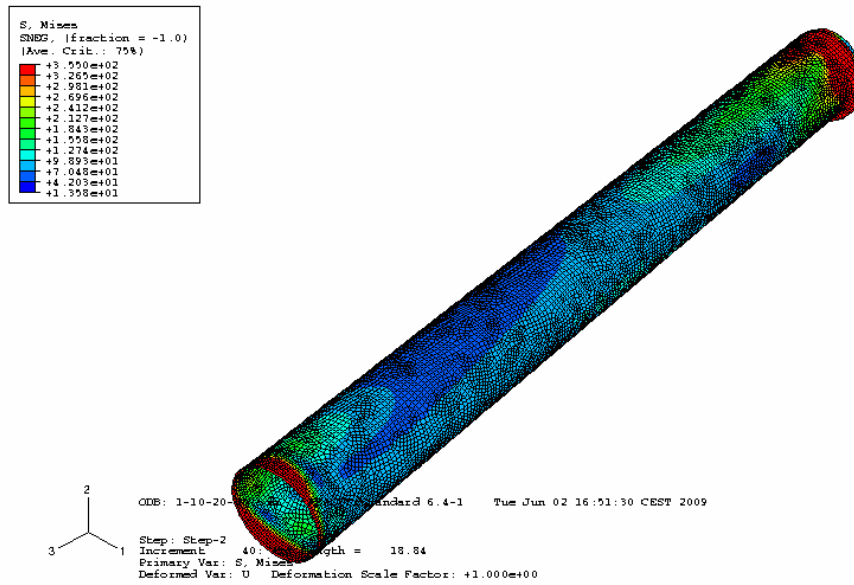


**Figura 3.13: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 0%.**

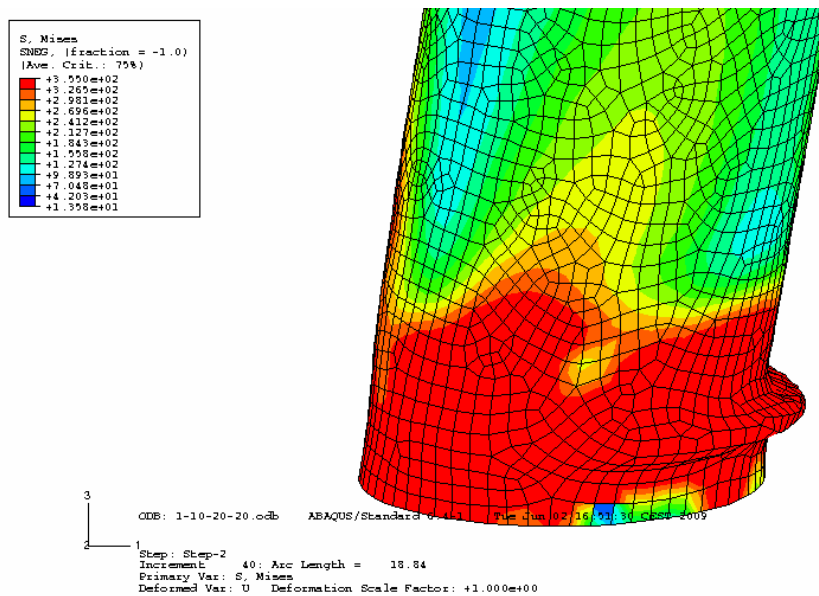


**Figura 3.14: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 0%.**

Càrrega del 20 %:



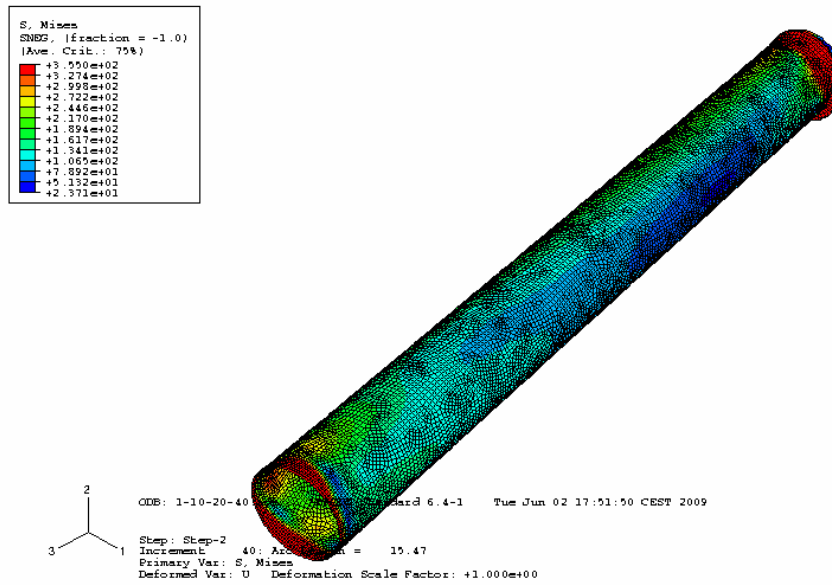
**Figura 3.15: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 20%.**



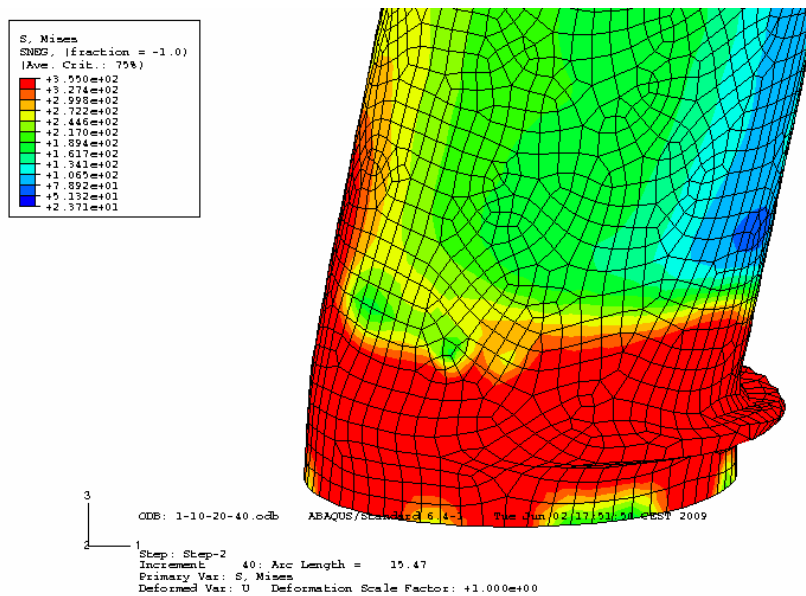
**Figura 3.16: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 20%.**



## Càrrega del 40 %

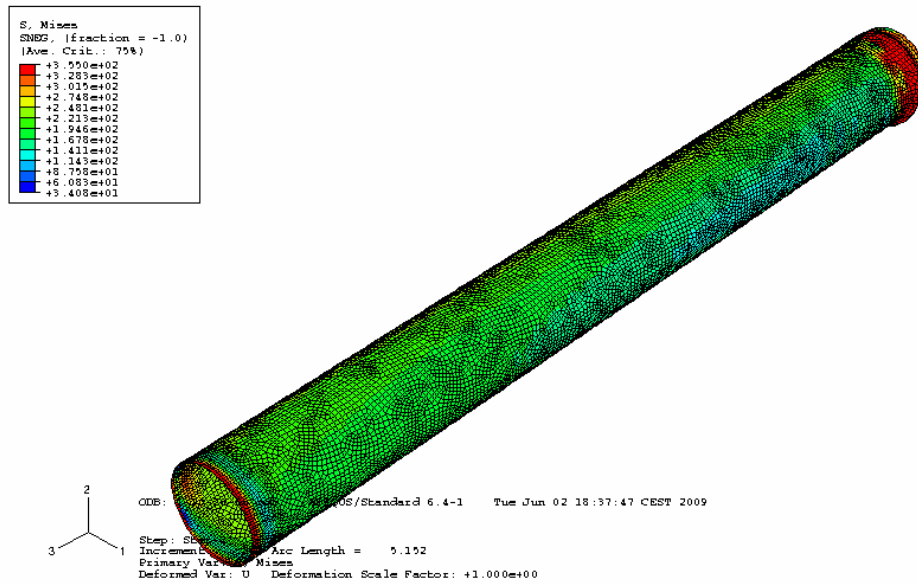


**Figura 3.17: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 40%.**

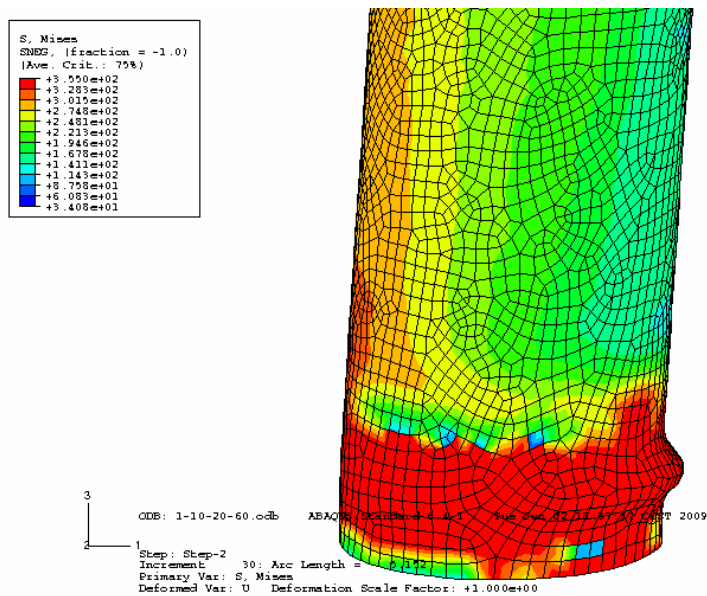


**Figura 3.18: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 40%.**

Càrrega del 60 %:

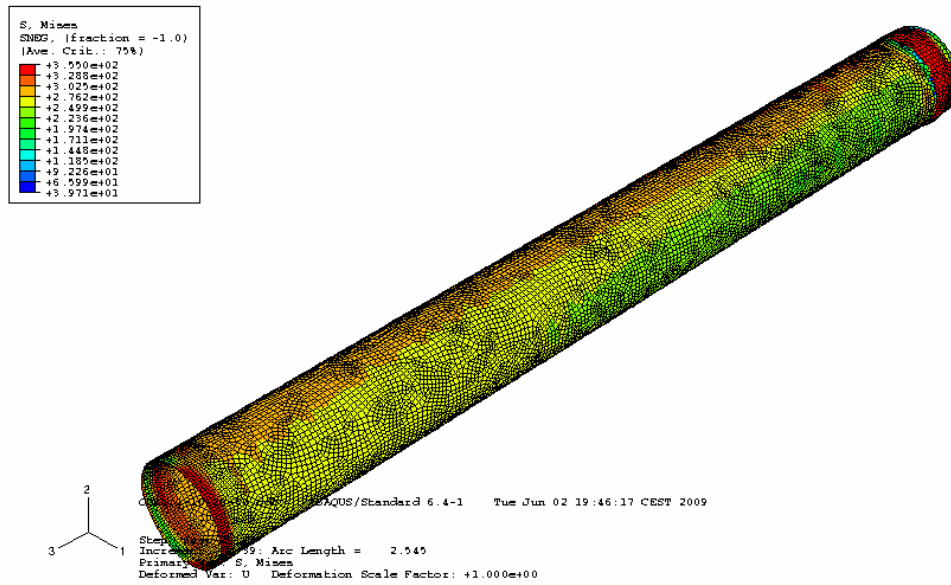


**Figura 3.19: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 60%.**

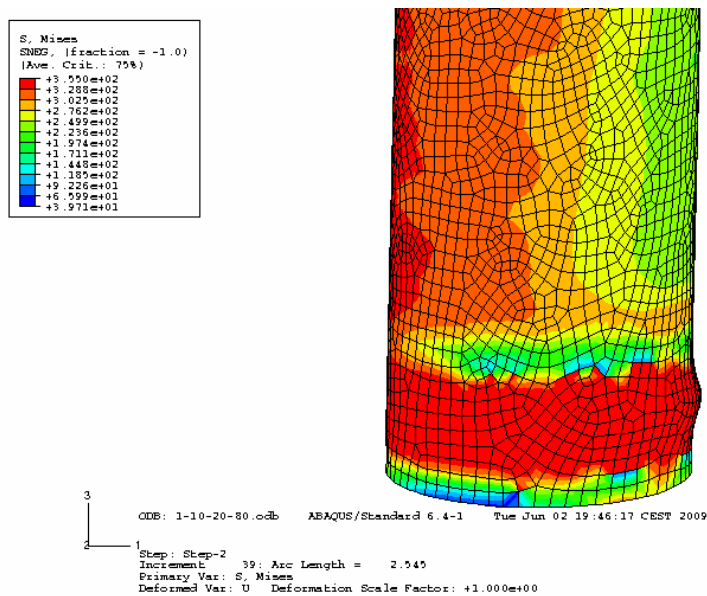


**Figura 3.20: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 60%.**

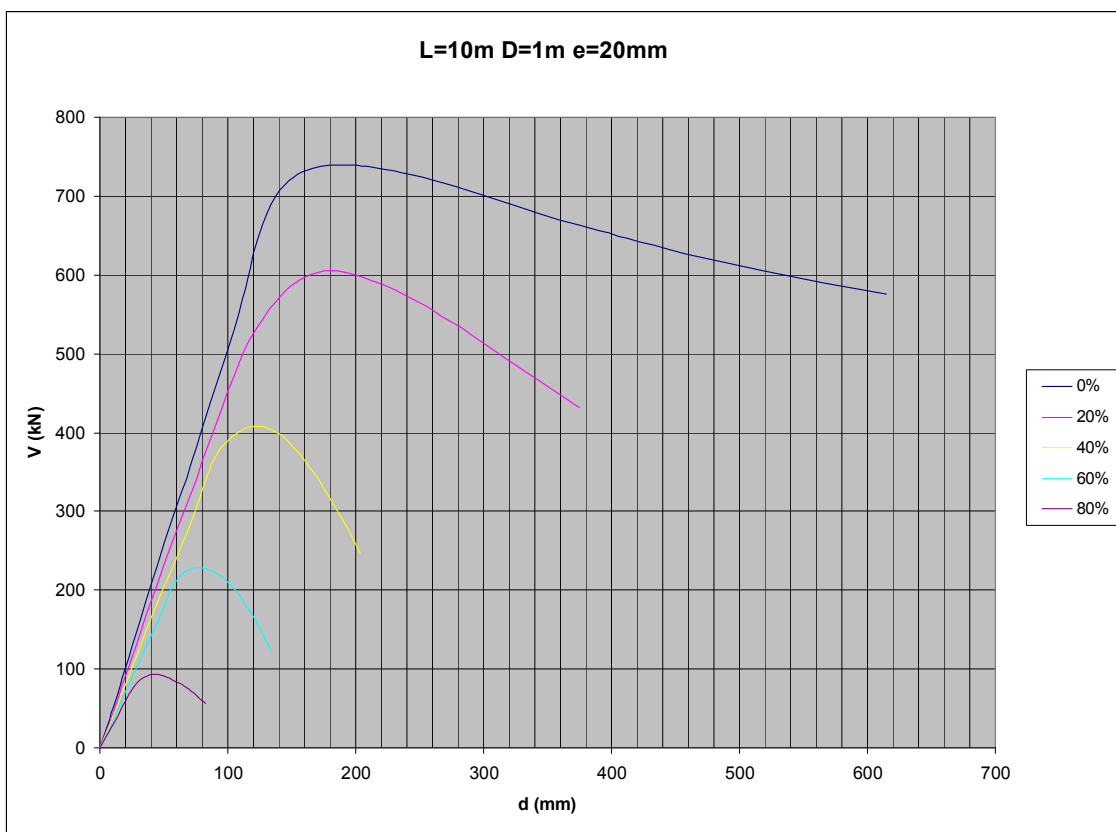
Càrrega del 80 %:



**Figura 3.21: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 80%.**

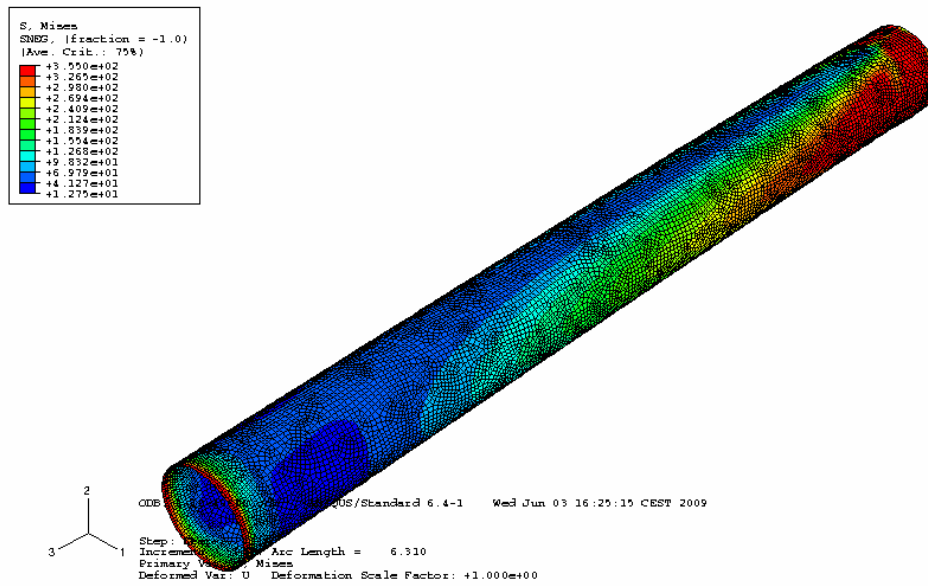


**Figura 3.22: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 80%**

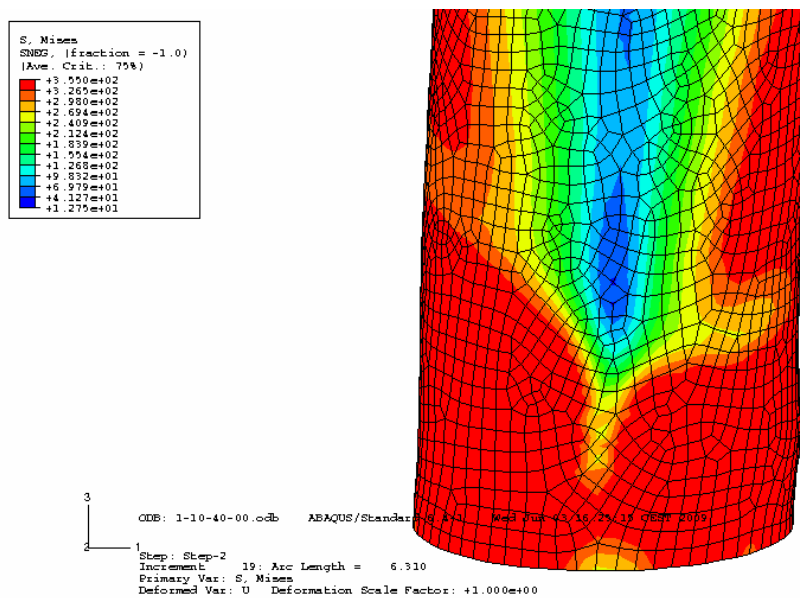


**Figura 3.23: Representació gràfica del comportament de la Peça 1 per a les càrregues del 0%, 20%, 40%, 60% i 80%.**

**Peça 2:**  
**Càrrega del 0 %:**

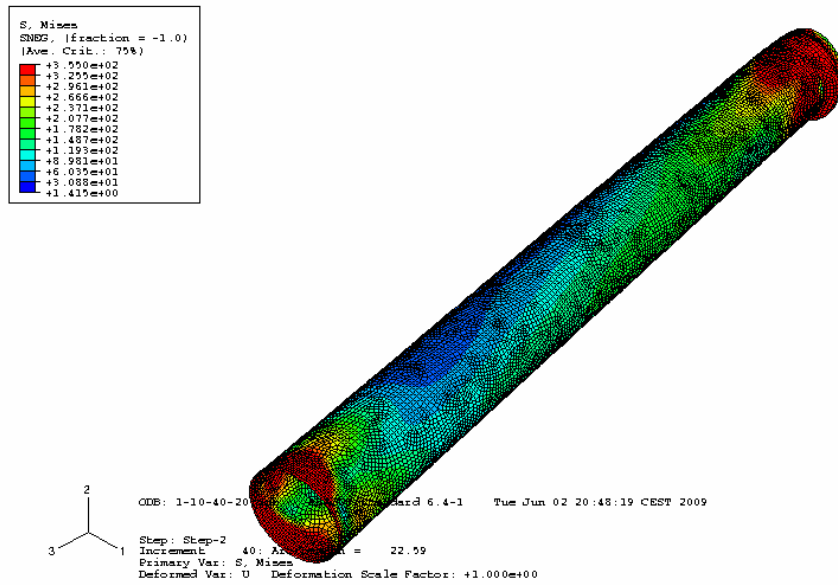


**Figura 3.24: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 0%.**

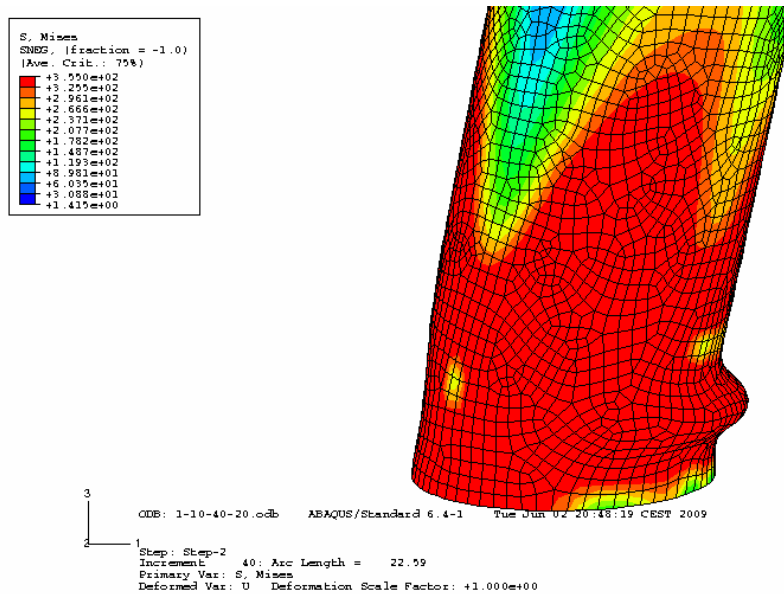


**Figura 3.25: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 0%.**

Càrrega del 20 %:

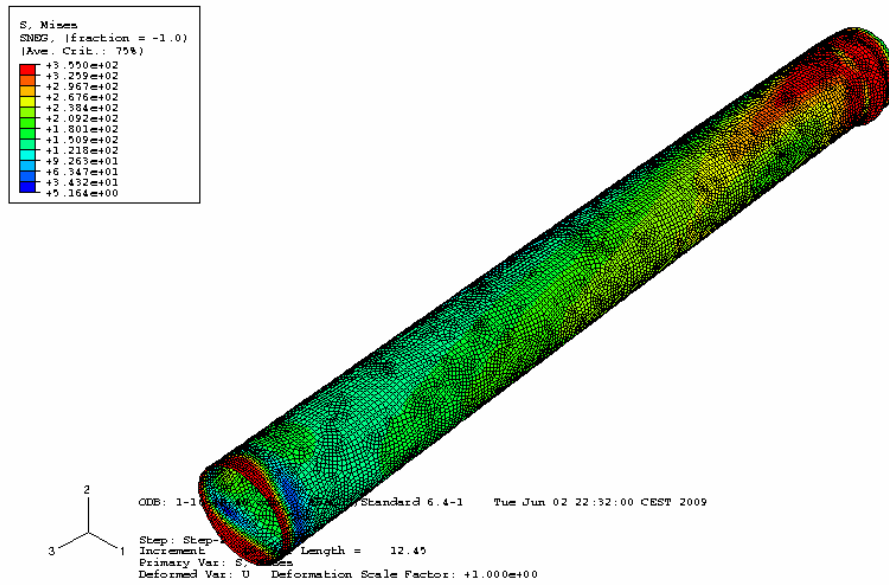


**Figura 3.26: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 20%.**

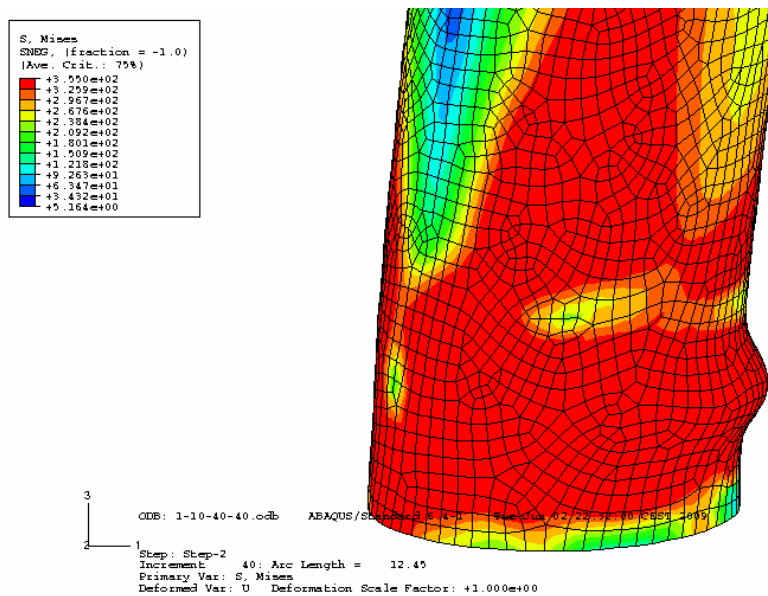


**Figura 3.27: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 20%.**

Càrrega del 40 %:

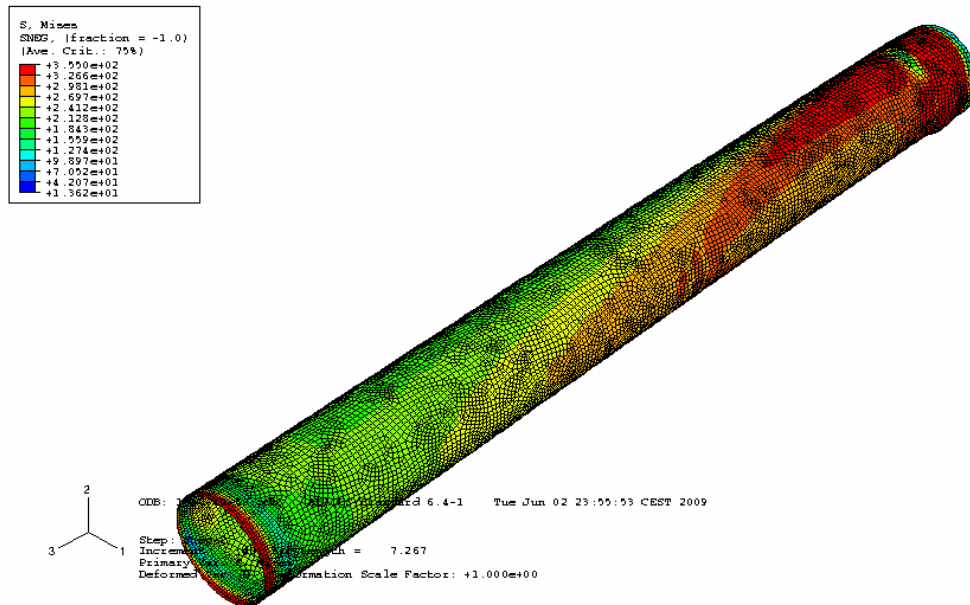


**Figura 3.28: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 40%.**

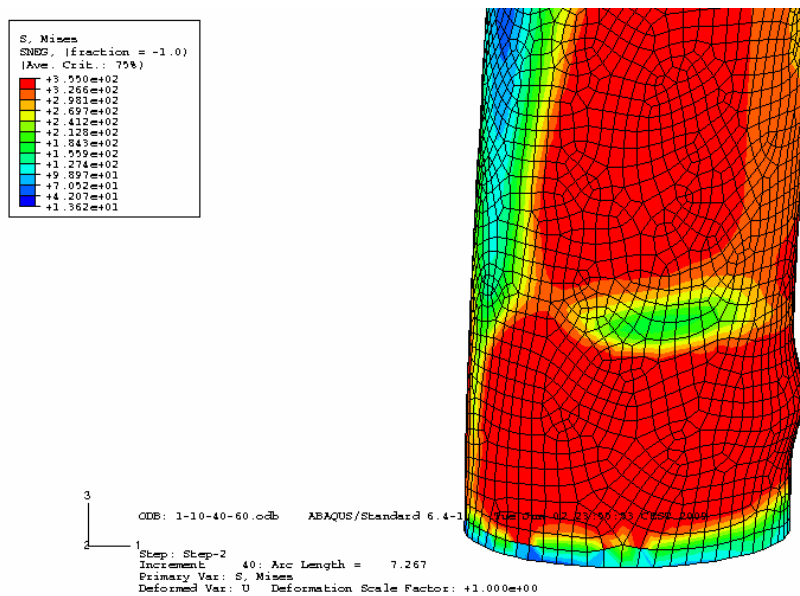


**Figura 3.29: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 40%.**

Càrrega del 60 %:



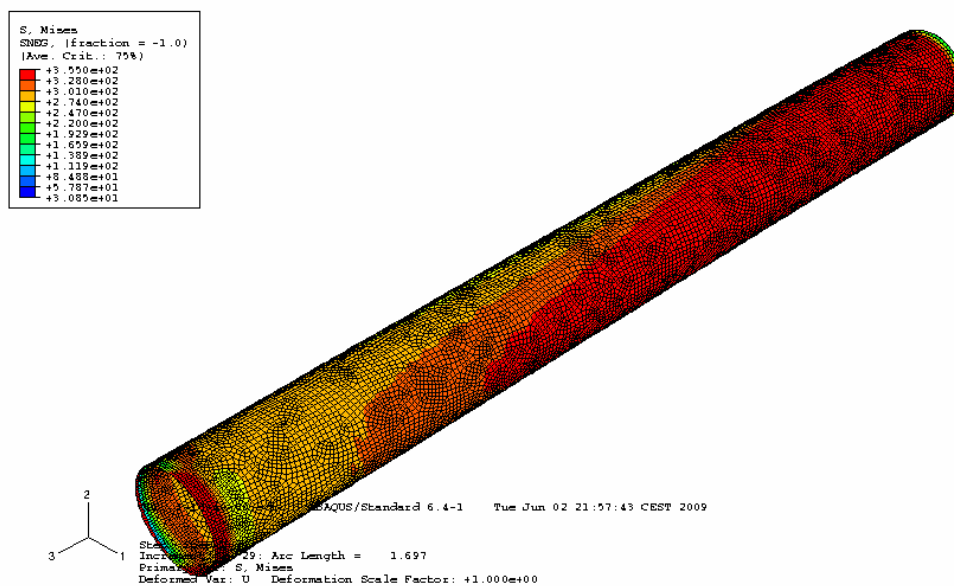
**Figura 3.30: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 60%.**



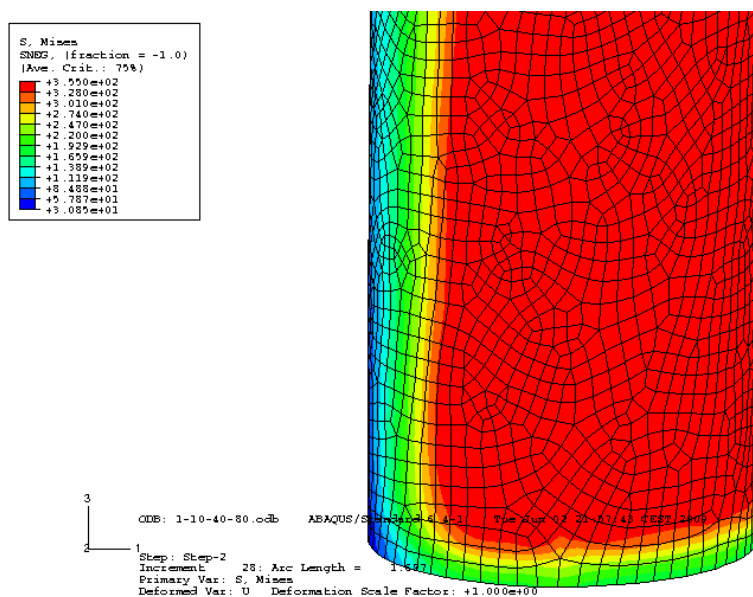
**Figura 3.31: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 60%.**



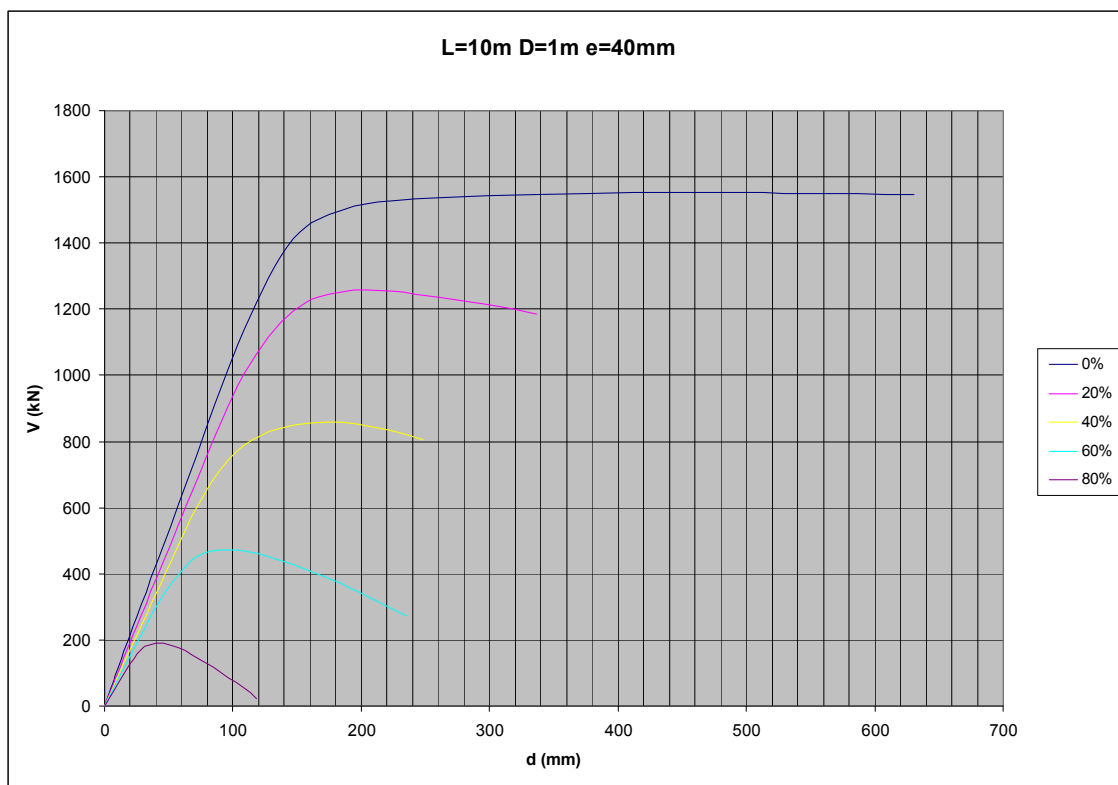
Càrrega del 80 %:



**Figura 3.32: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 80%.**

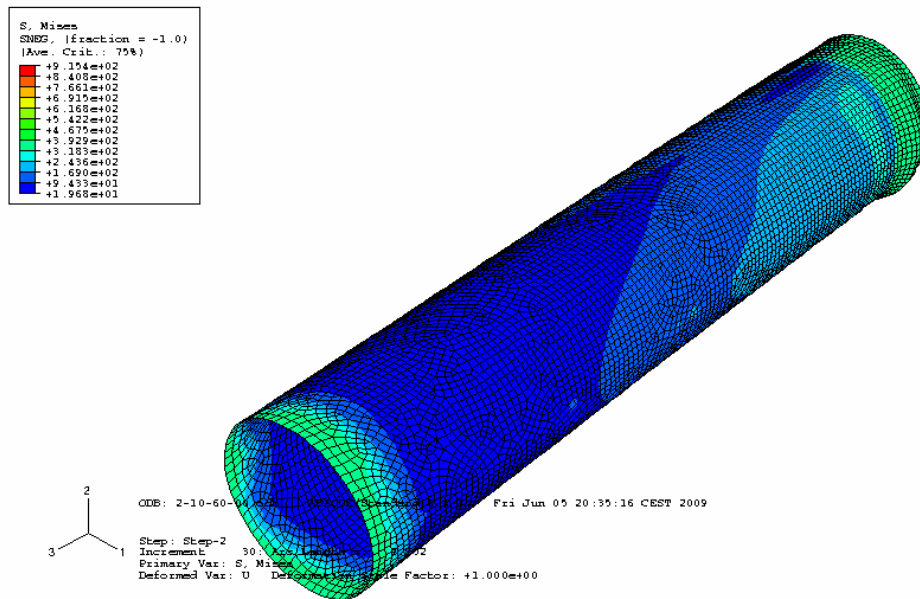


**Figura 3.33: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 80%.**

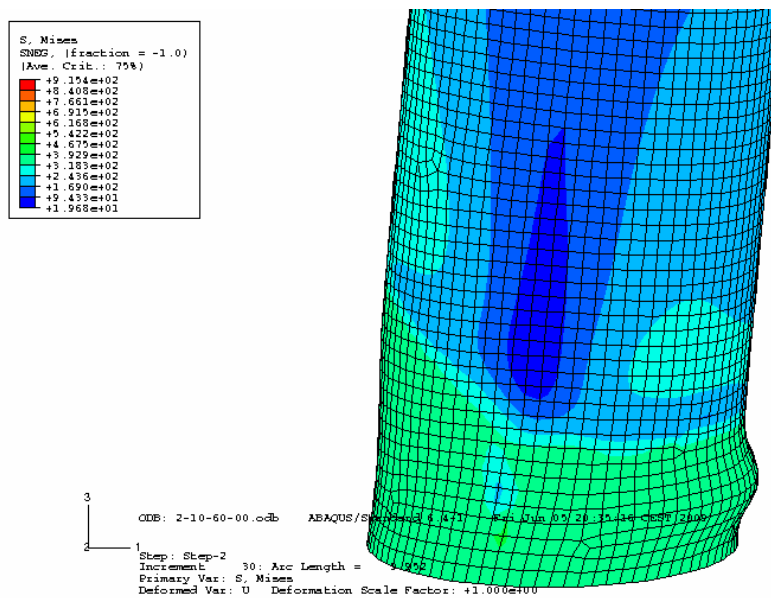


**Figura 3.34: Representació gràfica del comportament de la Peça 2 per a les càrregues del 0%, 20%, 40%, 60% i 80%.**

**Peça 5:**  
**Càrrega del 0 %:**

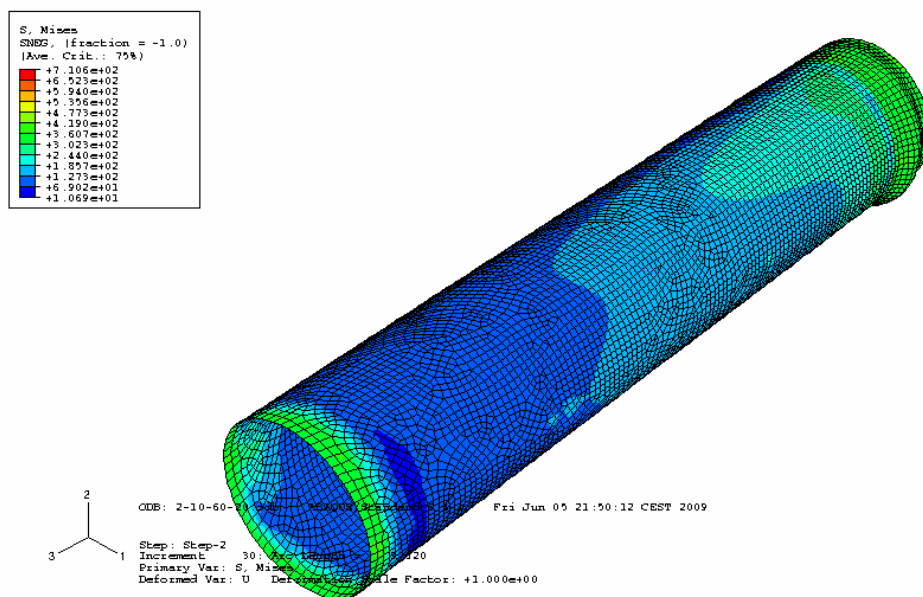


**Figura 3.35: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 0%.**

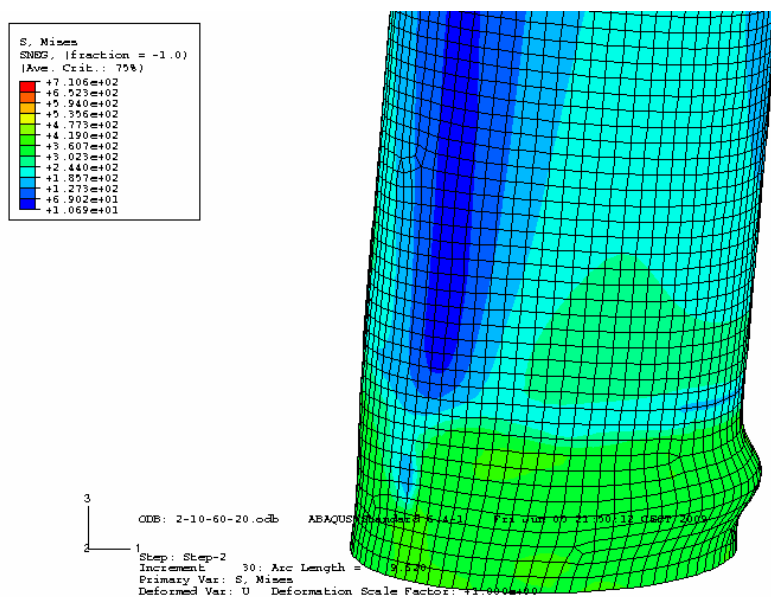


**Figura 3.36: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 0%.**

Càrrega del 20 %:

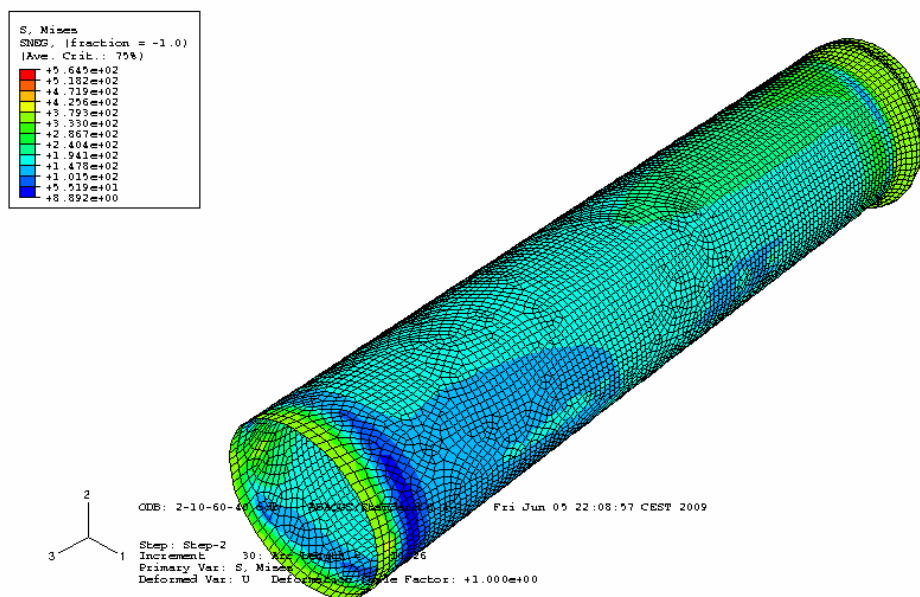


**Figura 3.37: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 20%.**

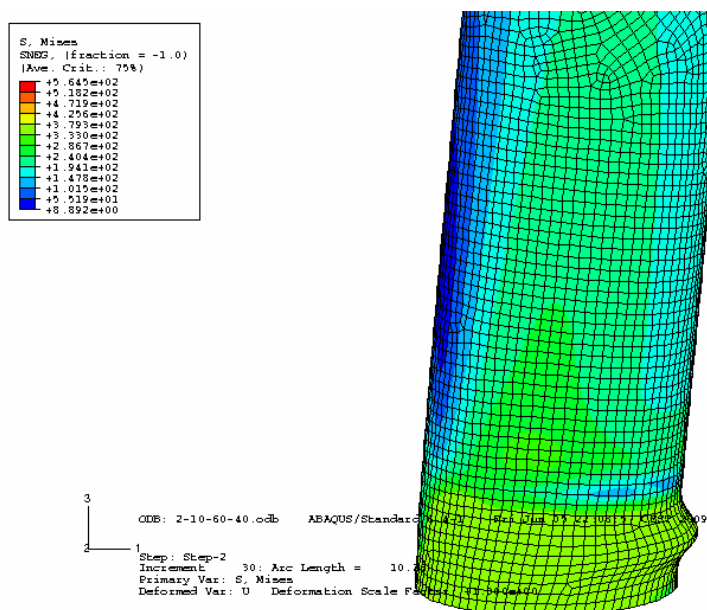


**Figura 3.38: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 20%.**

Càrrega del 40 %:

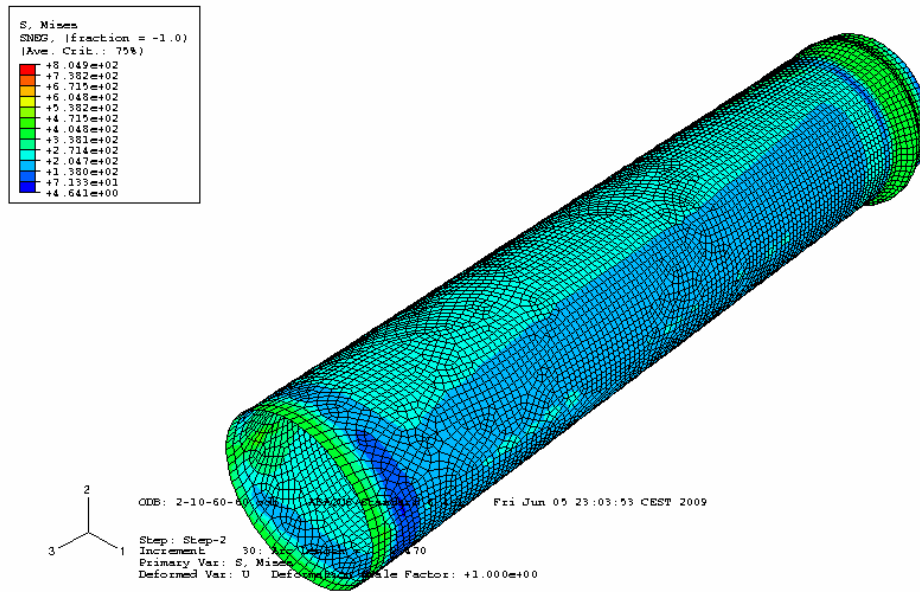


**Figura 3.39: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 40%.**

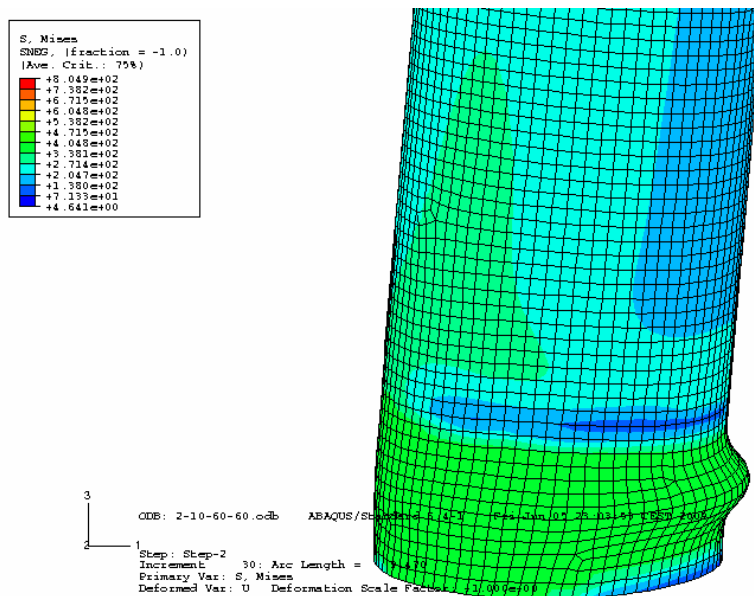


**Figura 3.40: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 40%.**

Càrrega del 60 %:

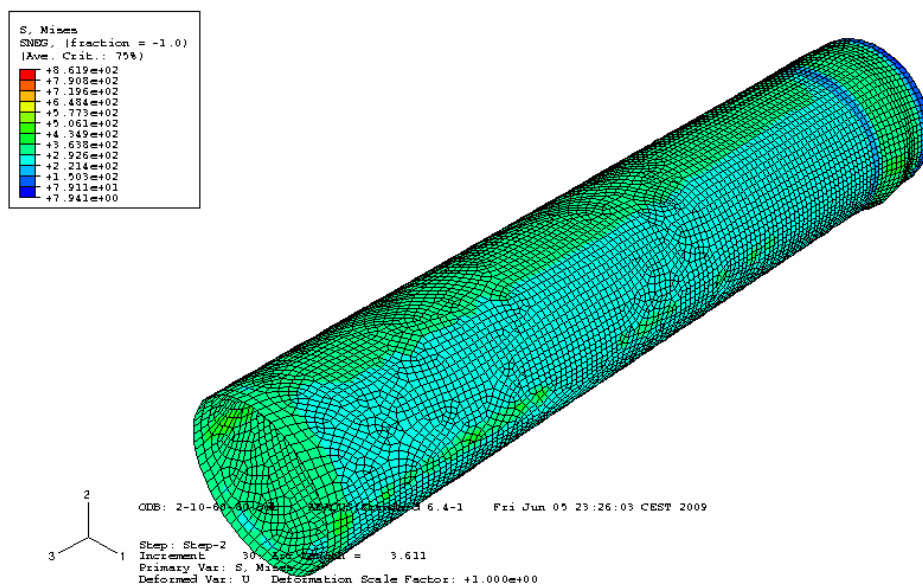


**Figura 3.41: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 60%.**

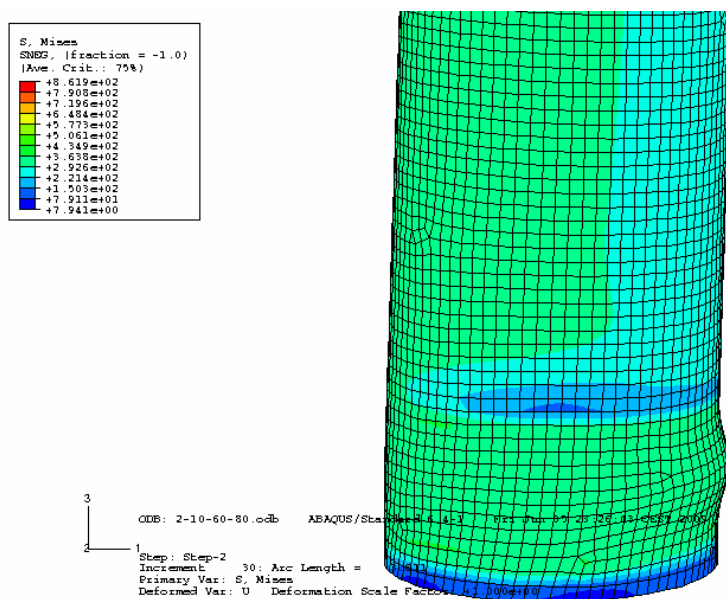


**Figura 3.42: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 60%.**

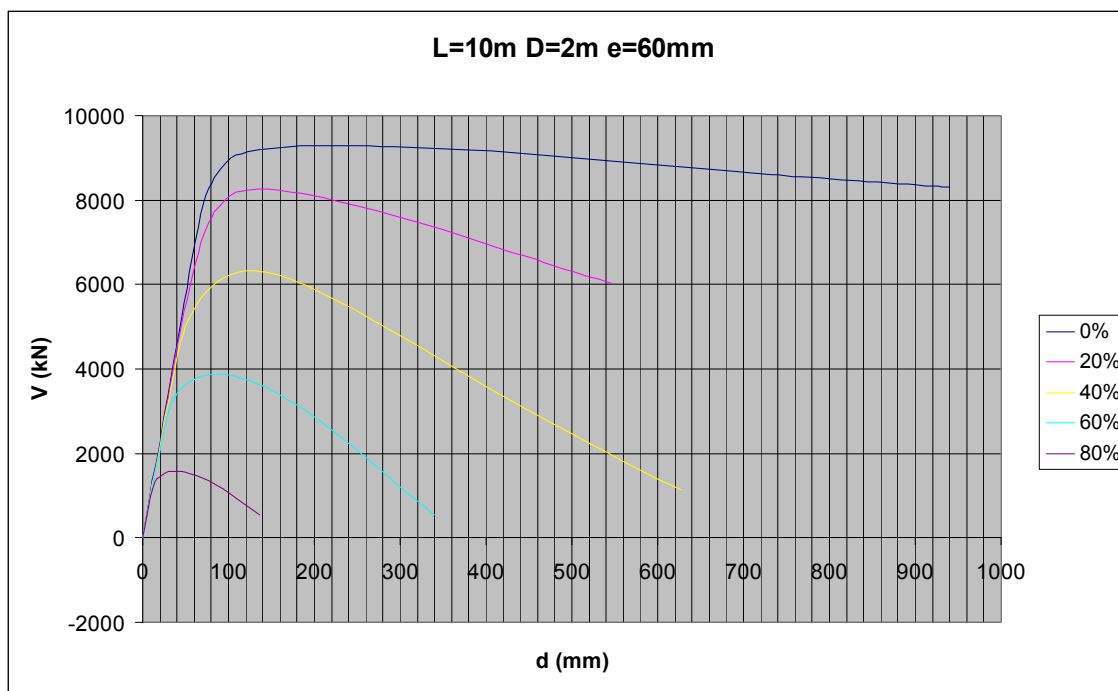
Càrrega del 80 %:



**Figura 3.43: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 80%.**



**Figura 3.44: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 80%.**



**Figura 3.45: Representació gràfica del comportament de la Peça 5 per a les càrregues del 0%, 20%, 40%, 60% i 80%.**



## 4. Anàlisi de resultats

En aquest capítol s'exposaran els anàlisis dels resultats obtinguts a partir dels anàlisis de Buckle i en els anàlisis no lineals per tal d'extreure totes les conclusions possibles.

### 4.1. Anàlisi de Buckle

A partir de l'anàlisi de Buckle s'obtenen els valors de l'axil crític de d'Euler. Aquest valor representa el límit superior teòric de l'axil de compressió a vinclament. Els resultats obtinguts ajudaran a estudiar el valor de la longitud crítica a vinclament. Aquesta longitud és la distància entre dos punts d'inflexió (punts de canvi de curvatura en una peça). A partir del valor de l'axil crític, obtingut mitjançant el programa Abaqus, es pot calcular el valor de la longitud crítica de cada peça i comparar-ho amb els cassos canònics. En la taula 4.1 es presenten els valors teòrics, els valors obtinguts amb el programa Abaqus i els resultats dels càlculs realitzats:

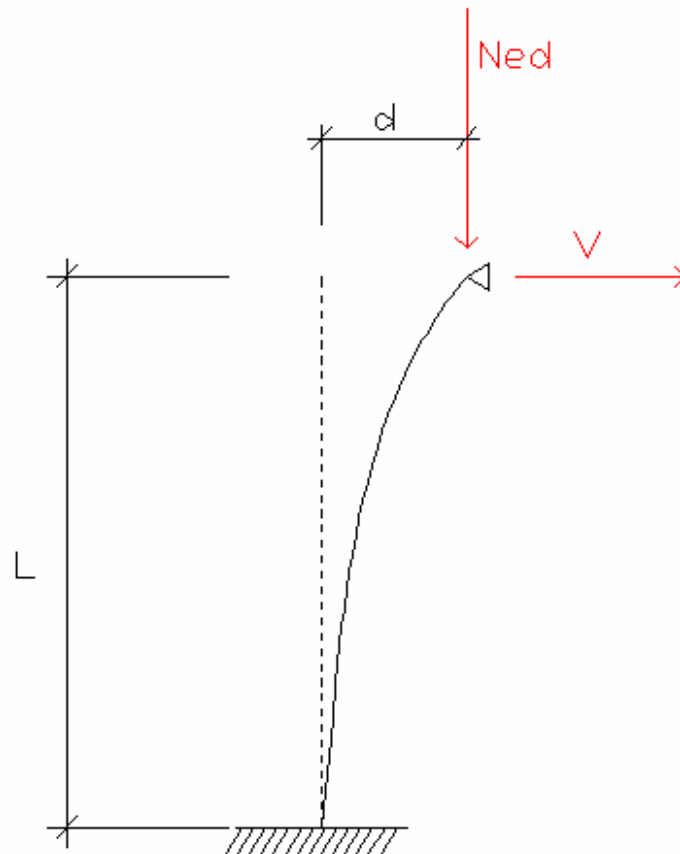
**Taula 4.1: Resultats obtinguts a partir de l'Anàlisi de Buckle**

Peça	Longitud (mm)	$N_{cr,e}$ (kN)	$N_{cr,abacus}$ (kN)	$N_{cr,abacus}/N_{cr,e}$	$L_{cr,teorica,abacus}$	k	Vinclament local	Vinclament global
1	10.000,00	332.342,99	208.930,56	0,63	8.828,57	0,88	v	
2	10.000,00	665.483,29	611.348,48	0,92	7.303,35	0,73		v
3	10.000,00	1.000.218,19	928.490,24	0,93	7.265,35	0,73		v
4	10.000,00	5.317.487,86	966.380,80	0,18	16.420,15	1,64	v	
5	10.000,00	7.980.218,31	2.099.353,60	0,26	13.647,80	1,36	v	
6	20.000,00	1.329.371,97	428.561,65	0,32	24.657,25	1,23	v	
7	20.000,00	1.995.054,58	1.825.124,37	0,91	14.637,24	0,73		v

A la vista dels resultats obtinguts, en general, es pot afirmar que en les peces de classe 1 (Peces 2 i 3) els valors de la longitud crítica és molt semblant a la dels casos canònics ( $k = 0,7$ ), ja que es produeix vinclament global. En canvi, en general, en les peces de classe 3 (Peces 1, 4 i 6), es pot afirmar que quan es produeix interacció d'inestabilitats locals i globals els valors de la longitud crítica no coincideix amb els casos canònics (Valors de  $k$  entre 0,88 i 1,64). Pel que fa a les peces de classe 2 (Peces 5 i 7), s'observa que les més esveltes (Peça 7) pateixen vinclament global i la seva longitud crítica coincideix amb els casos canònics. Pel que fa a les menys esveltes (Peça 5) es produeix vinclament local.

### 4.2. Anàlisi no lineal

Els resultats dels anàlisis no lineals han permès descriure el comportament de les peces mitjançant les gràfiques força - desplaçament ( $V - d$ ) representades a les figures de l'apartat 3.3.2. De cada gràfica es poden obtenir els valors del moment màxim que causa fallida en les peces. Aquest moment es calcula per equilibri de la peça tal com s'indica a la figura 4.1 a partir de l'expressió [4-1].



**Figura 4.1: Esquema modelitzat per a la pila actuant un axil a compressió i una força horitzontal en el cap de la pila.**

$$M_{Ed} = V \cdot L + N_{Ed} \cdot d \quad [4-1]$$

On  $N_{Ed}$  és l'axil a compressió aplicat,  $L$  la longitud de la peça,  $V$  la força horitzontal aplicada al cap de la pila i  $d$  el desplaçament provocat per l'acció de  $V$ .

A la taula 4.2, es troben els resultats dels moments màxims obtinguts a partir de les dades de l'anàlisi no lineal, segons les expressions anteriors. També s'inclouen els valors de les aportacions al moment màxim per part de l'axil de compressió i de la força horitzontal.

**Taula 4.2: Resultats del moment màxim obtinguts a partir de les dades de l'anàlisi no lineal i aportacions de l'axil de compressió i de la força horitzontal.**

Peça	Classe	$N_{Ed}/N_{c,Rd}$	$V_{max}$	$d(V_{max})$	$M_{max,total}$	$M_{axil}$	$M_{tallant}$
1	Classe 3	-	739,26	194,30	7.392,60	-	7.392,60
1	Classe 3	0,20	604,71	175,35	6.829,35	782,21	6.047,14
1	Classe 3	0,40	407,25	127,90	5.213,64	1.141,17	4.072,47
1	Classe 3	0,60	227,80	83,60	3.396,83	1.119,16	2.277,67
1	Classe 3	0,80	92,90	40,00	1.642,77	713,77	929,00
2	Classe 1	-	1.552,00	336,00	15.520,00	-	15.520,30
2	Classe 1	0,20	1.253,92	222,80	14.527,05	1.987,85	12.539,20
2	Classe 1	0,40	858,84	172,00	11.657,61	3.069,25	8.588,36
2	Classe 1	0,60	472,50	69,30	6.579,91	1.854,79	4.725,12
2	Classe 1	0,80	190,93	40,00	3.336,84	1.427,54	1.909,30
3	Classe 1	-	2.365,99	324,06	23.659,90	-	23.659,00
3	Classe 1	0,20	1.925,11	197,50	21.894,28	2.663,18	19.231,10
3	Classe 1	0,40	1.319,50	172,20	17.804,17	4.609,47	13.194,70
3	Classe 1	0,60	732,60	69,30	10.108,36	2.782,47	7.325,89
3	Classe 1	0,80	301,96	40,00	5.160,91	2.141,32	3.019,59
4	Classe 3	-	5.984,30	146,90	59.843,00	-	59.843,00
4	Classe 3	0,20	5.267,08	121,60	54.840,66	2.169,86	52.670,80
4	Classe 3	0,40	3.854,00	96,30	41.976,80	3.432,60	38.544,20
4	Classe 3	0,60	2.354,11	62,50	26.886,90	3.345,80	23.541,10
4	Classe 3	0,80	985,92	30,00	12.000,51	2.141,35	9.859,16
5	Classe 2	-	9.291,30	235,50	92.913,00	-	92.913,10
5	Classe 2	0,20	8.251,10	146,90	86.442,98	3.932,28	82.510,70
5	Classe 2	0,40	6.335,40	130,00	70.313,26	6.959,26	63.354,00
5	Classe 2	0,60	3.881,16	85,00	45.637,02	6.825,42	38.811,60
5	Classe 2	0,80	1.580,50	35,00	19.552,29	3.747,29	15.805,00
6	Classe 3	-	2.993,50	475,50	59.870,00	-	59.869,80
6	Classe 3	0,20	2.743,96	422,10	62.411,26	7.532,06	54.879,20
6	Classe 3	0,40	2.443,73	379,40	62.414,81	13.540,21	48.874,60
6	Classe 3	0,60	2.068,45	358,10	60.539,07	19.170,07	41.369,00
6	Classe 3	0,80	1.650,38	308,20	55.005,99	21.998,39	33.007,60
7	Classe 2	-	4.658,72	721,15	93.174,40	-	93.174,40
7	Classe 2	0,20	4.241,61	464,86	97.274,81	12.442,61	84.832,20
7	Classe 2	0,40	3.785,50	422,10	98.306,17	22.595,77	75.710,40
7	Classe 2	0,60	3.214,00	379,40	94.745,48	30.459,08	64.286,40
7	Classe 2	0,80	2.594,22	336,70	87.933,35	36.048,95	51.884,40

Els valors obtinguts en la taula 4.2, representen els valors màxims dels moments per a cada cas de càrrega establert, obtinguts del valor màxim de la força horitzontal i el desplaçament corresponent a aquesta força. A priori es podria establir una relació entre el desplaçament i la força aplicada. Segons la teoria lineal, el valor del desplaçament depèn de la força horitzontal aplicada i la seva relació és lineal, tal com s'exposa en l'expressió [4-2].

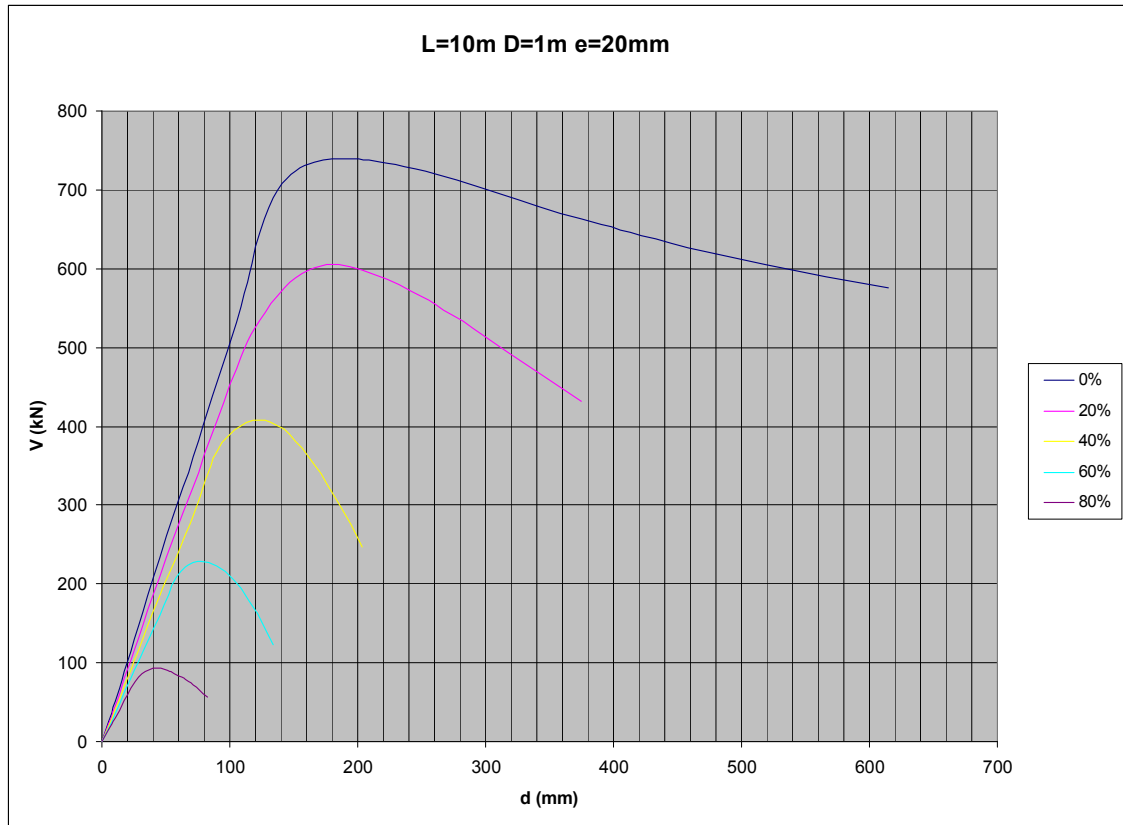
$$d_{teòrica} = \frac{V \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad [4-2]$$

Es pot comparar el valor obtingut de l'anàlisi no lineal amb el valor teòric, i així comprovar si s'ha perdut la linealitat del comportament del material.

A continuació es realitzaran els anàlisis dels resultats obtinguts de les diferents peces, estudiant el seu comportament segons l'evolució de càrrega i comparant els resultats obtinguts amb els paràmetres teòrics, considerant una peça representativa de cada classe.

#### 4.2.1. Peces Classe 3

Per realitzar l'anàlisi de les peces de classe 3, s'ha considerat com a peça representativa la Peça 1. En la figura 4.2 es mostra el comportament de la Peça 1 segons els diferents casos de càrrega.



**Figura 4.2: Representació gràfica del comportament de la Peça 1 per a les càrregues del 0%, 20%, 40%, 60% i 80%.**

Com es pot observar en la taula 4.2, s'ha calculat el valor del moment màxim total obtingut amb Abaqus ( $M_{\text{màx, total}}$ ). Aquest valor es pot comparar amb el valor resistent màxim teòric de la secció ( $M_{c, Rd}$ ), calculat mitjançant les expressions de la teoria de la resistència de materials. També es poden comparar amb els valors del màxim moment que resisteix la secció si es té en compte que actua alhora un axil. Aquest  $M_{\text{teòric}}$  es calcula amb les fórmules d'interacció axil – flector, com s'ha explicat al apartat 2.5.

A la taula 4.3 es troben els valors de la resistència de càlcul de la secció a flexió ( $M_{c, Rd}$ ), el moment màxim total obtingut amb Abaqus ( $M_{\text{màx, total}}$ ) i el moment que resisteix la secció si es té en compte que actua alhora un axil ( $M_{\text{teòric}}$ ).

**Taula 4.3: Valors dels moments màxims teòrics comparats amb els valors obtinguts amb el programa Abaqus per a la Peça 1.**

Peça	Classe	$N_{Ed}/N_{c,Rd}$	$M_{max,total}$	$M_{max,total}/M_{c,Rd}$	$M_{teòric}$	$M_{max,total}/M_{teòric}$
1	Classe 3	-	7.392,60	1,35	5.469,17	1,35
1	Classe 3	0,20	6.829,35	1,25	4.375,34	1,56
1	Classe 3	0,40	5.213,64	0,95	3.281,50	1,59
1	Classe 3	0,60	3.396,83	0,62	2.187,67	1,55
1	Classe 3	0,80	1.642,77	0,30	1.093,83	1,50

A la taula 4.2 es pot veure que els moments màxims totals que resisteixen cadascuna de les peces és redueixen a mesura que l'axil aplicat augmenta. Aquest comportament és l'esperat per a la interacció axil – flector. Si es considera la relació entre el moment obtingut a partir del programa Abaqus i el valor del moment teòric obtingut de la interacció axil – flector, es veu que el valor del programa Abaqus es superior al teòric. Això és indicatiu de que aquestes reduccions del flector proposades deixen del cantó de la seguretat en aquest tipus de classe.

A continuació es presenta la taula 4.4 que inclou els valors dels desplaçaments obtinguts amb el programa Abaqus per als valors de la màxima força horitzontal ( $d(V_{max})$ ) resistida per la Peça 1 i els valors dels desplaçaments corresponents a la màxima força horitzontal resistida per la peça obtinguts mitjançant la teoria lineal ( $d_{teòrica}$ ) com s'explica a l'apartat 4.2.

**Taula 4.4: Valors dels desplaçaments teòrics comparats amb els valors obtinguts amb el programa Abaqus (en mm) per a la Peça 1.**

Peça	Classe	$N_{Ed}/N_{c,Rd}$	$d(V_{max})$	$d_{teòrica}$	$d(V_{max})/d_{teòrica}$
1	Classe 3	-	194,30	149,35	1,30
1	Classe 3	0,20	175,35	122,16	1,44
1	Classe 3	0,40	127,90	82,27	1,55
1	Classe 3	0,60	83,60	46,02	1,82
1	Classe 3	0,80	40,00	18,77	2,13

Com es pot observar a la taula 4.4 , el valor del desplaçament de la força horitzontal màxima és sempre superior al valor teòric. Això indica que s'ha perdut el comportament lineal de les peces, confirmant el caràcter dúctil d'aquestes. Es veu que els desplaçaments obtinguts mitjançant el programa Abaqus augmenten més en relació als valors de la teoria lineal a mesura que l'axil aplicat augmenta. Això es pot comprovar observant els pendents obtinguts per a cada cas de càrrega de la figura 4.1. A mesura que l'axil aplicat augmenta, el pendent del tram lineal disminueix, per tant s'allunya cada cop més de la teoria lineal.

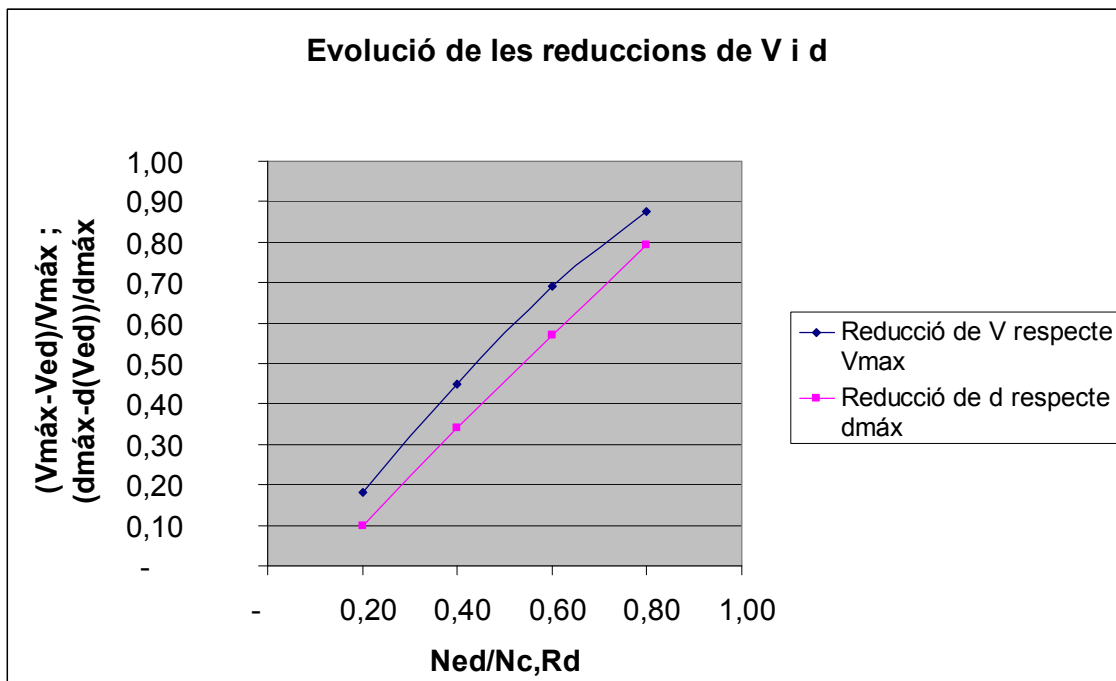
Seguidament, es presenta la taula 4.5 on es troben els valors utilitzats en l'anàlisi del comportament sota càrrega de les peces. S'inclouen les reduccions de forces i desplaçaments que es produeixen en funció de cada cas de càrrega i en funció del valor màxim obtingut.

**Taula 4.5: Valors utilitzats per a l'estudi del comportament sota càrrega de les peces de classe 3.**

Peça	Classe	$N_{Ed}/N_{c,Rd}$	$\Delta V/V_{ant}$	$\Delta V/V_{max}$	$\Delta d/d_{ant}$	$\Delta d/d_{max}$
1	Classe 3	-				
1	Classe 3	0,20	0,18	0,18	0,10	0,10
1	Classe 3	0,40	0,33	0,45	0,27	0,34
1	Classe 3	0,60	0,44	0,69	0,35	0,57
1	Classe 3	0,80	0,59	0,87	0,52	0,79

En la taula 4.5 s'observa que a mesura que l'axil augmenta, la reducció de la força horitzontal màxima i el seu desplaçament corresponent respecte el valor anterior ( $\Delta V/V_{ant}$  i  $\Delta d/d_{ant}$ ) és cada cop més important, arribant-se a reduir a més de la meitat entre els valors del 60% i el 80% del  $N_{c,Rd}$ . Si es miren les reduccions d'axil i desplaçament respecte als valors màxims ( $\Delta V/V_{max}$  i  $\Delta d/d_{max}$ ), es pot comprovar que en el cas de la força horitzontal la reducció és casi del 90%. Pel que fa als desplaçaments és aproximadament del 80%.

En la figura 4.3 es presenten les evolucions de les reduccions de forces i desplaçaments per la Peça 1 representativa de les peces de classe 3.



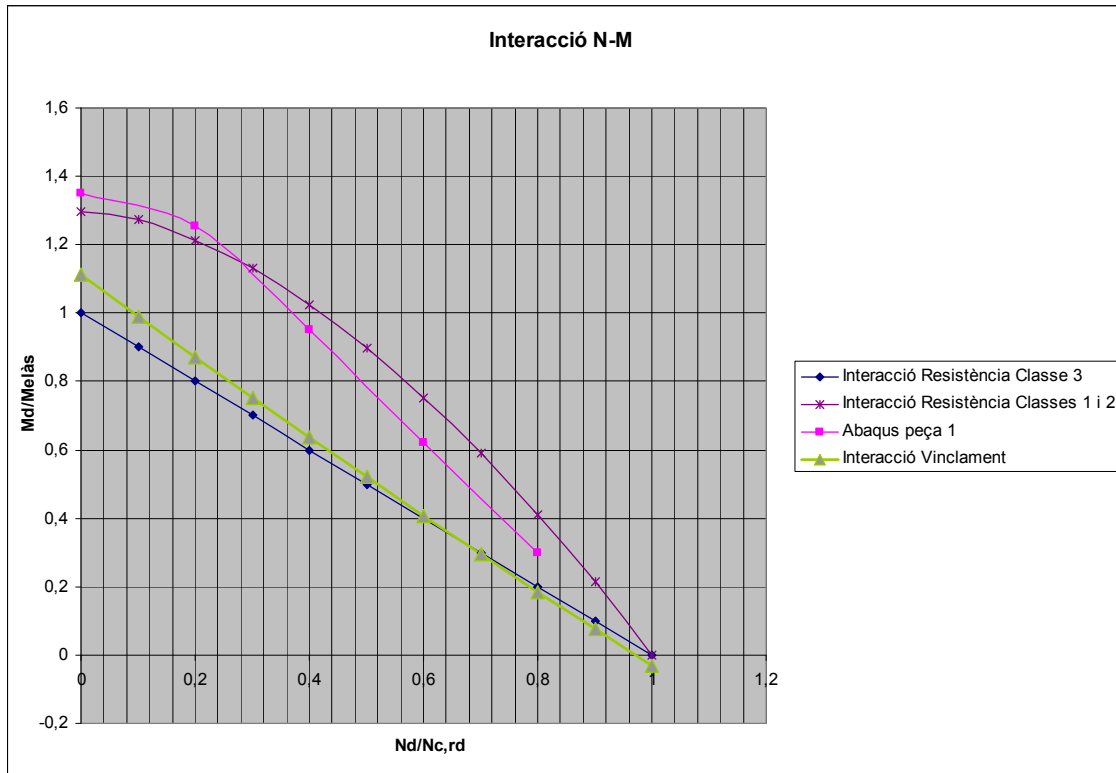
**Figura 4.3: Evolució de la reducció de V i d respecte els valors màxims.**

En la figura 4.3 es veu que la evolució de V respecte el valor de  $V_{m\acute{a}x}$  té un caràcter lineal. Pel que fa als desplaçaments, l'evolució de la reducció de desplaçaments respecte al valor de  $d_{m\acute{a}x}$  és també lineal.

Si entenem que la pèrdua de ductilitat d'una peça està relacionada amb la reducció del desplaçament màxim al incrementar l'esforç a compressió en relació al valor del desplaçament màxim obtingut en el cas que la càrrega a compressió sigui nul·la,

dimensionar la pila d'un pont integral de classe 3 entre el valor del 50% de l'axil resistent seria òptim, ja que s'asseguraria que la reducció del  $d_{\text{máx}}$  és menor del 50%.

En la figura 4.4, es presenten els resultats obtinguts en l'estudi de la interacció entre axil i flector. La figura inclou els criteris d'interacció axil – flector segon els criteris de resistència de la secció i segons criteris de vinclament i la corba de resultats obtinguts a partir del programa Abaqus. Pel que fa als criteris d'interacció axil – flector, s'han representat tant els casos de les classes 1 i 2 i el de la classe 3. Aquesta figura ajudarà a comparar els valors obtinguts amb el programa Abaqus i els criteris de les normatives.



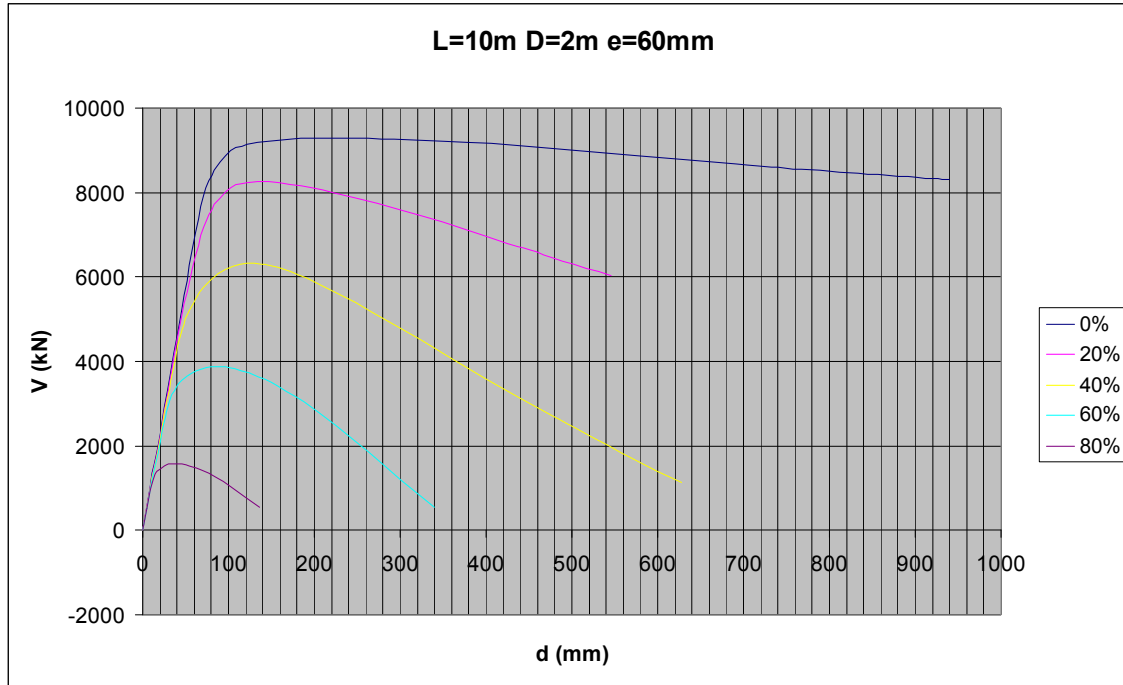
**Figura 4.4: Gràfiques d'interacció entre axil i flector per a la Peça 1.**

Segons les gràfiques de la figura 4.4, per a valors de l'axil aplicat entre el 0% i el 70% de l'axil resistent els criteris d'interacció estan limitats per efectes de resistència de la secció. Per valors d'axil aplicat superiors al 70% de l'axil resistent, els criteris d'interacció queden limitats per efectes de vinclament.

La figura 4.4 permet observar que els esforços obtinguts amb Abaqus de la Peça 1 queden per sobre dels valors adoptats per al seu tipus de classe. De fet, el comportament de la Peça 1, segons els càlculs d'Abaqus són més semblants a una secció de classe 2. Pel que fa a la normativa, els valors límits en la interacció axil – flector per efectes de resistència de la secció i per efectes de vinclament són força conservatius. Això implica que a l'hora de dimensionar una pila de pont integral de classe de secció 3, ens quedarà una reserva de resistència força considerable, sobretot per a valors baixos d'axil aplicat, aproximadament del 30%.

#### 4.2.2. Peces Classe 2

Per realitzar l'anàlisi de les peces de classe 2, s'ha considerat com a peça representativa la Peça 5. En la figura 4.5, es mostra el comportament de la Peça 5 segons els diferents casos de càrrega.



**Figura 4.5: Representació gràfica del comportament de la Peça 5 per a les càrregues del 0%, 20%, 40%, 60% i 80%.**

Com es pot observar en la taula 4.2, s'ha calculat el valor del moment màxim total obtingut amb Abaqus ( $M_{\text{màx},\text{total}}$ ). Aquest valor és comparable amb el valor resistent màxim teòric de la secció ( $M_{c,Rd}$ ), calculat mitjançant les expressions de la teoria de la resistència de materials. També es poden comparar amb els valors del màxim moment que resisteix la secció si es té en compte que actua alhora un axil. Aquest  $M_{\text{teòric}}$  es calcula amb les fórmules d'interacció axil – flector, com s'ha explicat al apartat 2.5.

A la taula 4.6 es troben els valors de la resistència de càlcul de la secció a flexió ( $M_{c,Rd}$ ), el moment màxim total obtingut amb Abaqus ( $M_{\text{màx},\text{total}}$ ) i el moment que resisteix la secció si es té en compte que actua alhora un axil ( $M_{\text{teòric}}$ ).

**Taula 4.6: Valors dels moments màxims teòrics comparats amb els valors obtinguts amb el programa Abaqus per a la Peça 5.**

Peça	Classe	$N_{Ed}/N_{c,Rd}$	$M_{\text{màx},\text{total}}$	$M_{\text{màx},\text{total}}/M_{c,Rd}$	$M_{\text{teòric}}$	$M_{\text{màx},\text{total}}/M_{\text{teòric}}$
5	Classe 2	-	92.913,00	1,09	85.225,56	1,09
5	Classe 2	0,20	86.442,98	1,01	75.501,96	1,14
5	Classe 2	0,40	70.313,26	0,83	56.435,90	1,25
5	Classe 2	0,60	45.637,02	0,54	37.496,89	1,22
5	Classe 2	0,80	19.552,29	0,23	18.684,92	1,05



A la taula 4.6., es veu que els moments màxims totals que resisteixen cadascuna de les peces es redueixen a mesura que l'axil aplicat augmenta. Aquest comportament és l'esperat per a la interacció axil – flector. Si es considera la relació entre el moment obtingut a partir del programa Abaqus i el valor del moment teòric obtingut de la interacció axil – flector, es veu que el valor del programa Abaqus es superior al teòric. Això és indicatiu de que aquestes reduccions del flector proposades deixen del cantó de la seguretat en aquest tipus de classe.

A continuació es presenta la taula 4.7, que inclou els valors dels desplaçaments obtinguts amb el programa Abaqus per als valors de la màxima força horitzontal ( $d(V_{\max})$ ) resistida per la Peça 5 i els valors dels desplaçaments corresponents a la màxima força horitzontal resistida per la peça obtinguts mitjançant la teoria lineal ( $d_{\text{teòrica}}$ ) com s'explica a l'apartat 4.2.

**Taula 4.7: Valors dels desplaçaments teòrics comparats amb els valors obtinguts amb el programa Abaqus (en mm) per a la Peça 5.**

Peça	Classe	$N_{Ed}/N_{c,Rd}$	$d(V_{\max})$	$d_{\text{teòrica}}$	$d(V_{\max})/d_{\text{teòrica}}$
5	Classe 2	-	235,50	78,17	3,01
5	Classe 2	0,20	146,90	69,42	2,12
5	Classe 2	0,40	130,00	53,30	2,44
5	Classe 2	0,60	85,00	32,65	2,60
5	Classe 2	0,80	35,00	13,30	2,63

Com s'observa a la taula 4.7 , el valor del desplaçament de la força horitzontal màxima és sempre superior al valor teòric. Això indica que s'ha perdut el comportament lineal de les peces, confirmant el caràcter dúctil d'aquestes. Es pot veure que els desplaçaments obtinguts mitjançant el programa Abaqus augmenten més en relació als valors de la teoria lineal a mesura que l'axil aplicat augmenta. Això es comprova observant els pendents obtinguts per a cada cas de càrrega de la figura 4.5. A mesura que l'axil aplicat augmenta, el pendent del tram lineal disminueix, per tant s'allunya cada cop més de la teoria lineal.

A continuació es presenta la taula 4.8. on es troben els valors utilitzats en l'anàlisi del comportament sota càrrega de les peces. S'inclouen les reduccions de forces i desplaçaments que es produeixen en funció de cada cas de càrrega i en funció del valor màxim obtingut.

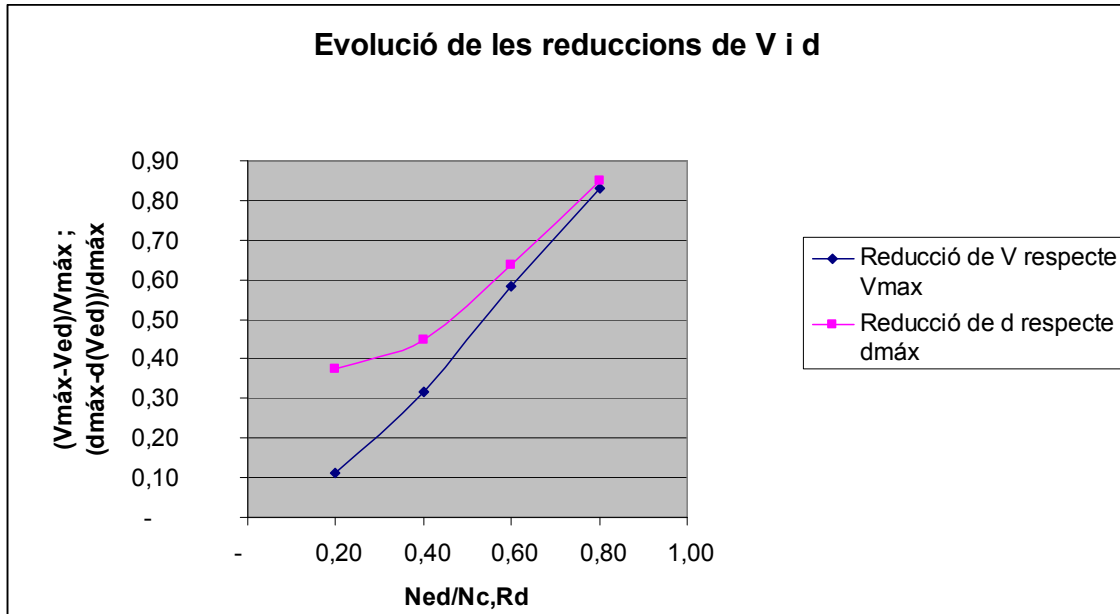
**Taula 4.8: Valors utilitzats per a l'estudi del comportament sota càrrega de les peces de classe 2.**

Peça	Classe	$N_{Ed}/N_{c,Rd}$	$\Delta V/V_{\text{ant}}$	$\Delta V/V_{\text{max}}$	$\Delta d/d_{\text{ant}}$	$\Delta d/d_{\text{max}}$
5	Classe 2	-				
5	Classe 2	0,20	0,11	0,11	0,38	0,38
5	Classe 2	0,40	0,23	0,32	0,12	0,45
5	Classe 2	0,60	0,39	0,58	0,35	0,64
5	Classe 2	0,80	0,59	0,83	0,59	0,85

En la taula 4.8 s'observa que a mesura que l'axil augmenta, la reducció de la força horitzontal màxima i el seu desplaçament corresponent respecte el valor anterior ( $\Delta V/V_{\text{ant}}$  i  $\Delta d/d_{\text{ant}}$ ) és cada cop més important, arribant-se a reduir un 60% entre els valors del 60% i el 80% del  $N_{c,Rd}$ . Si es miren les reduccions d'axil i desplaçament

respecte als valors màxims ( $\Delta V/V_{\max}$  i  $\Delta d/d_{\max}$ ), es pot comprovar que en el cas de la força horitzontal la reducció és aproximadament del 80%. Pel que fa als desplaçaments és del 85%.

En la figura 4.6 es presenten les evolucions de les reduccions de forces i desplaçaments per la Peça 5 representativa de les peces de classe 2.

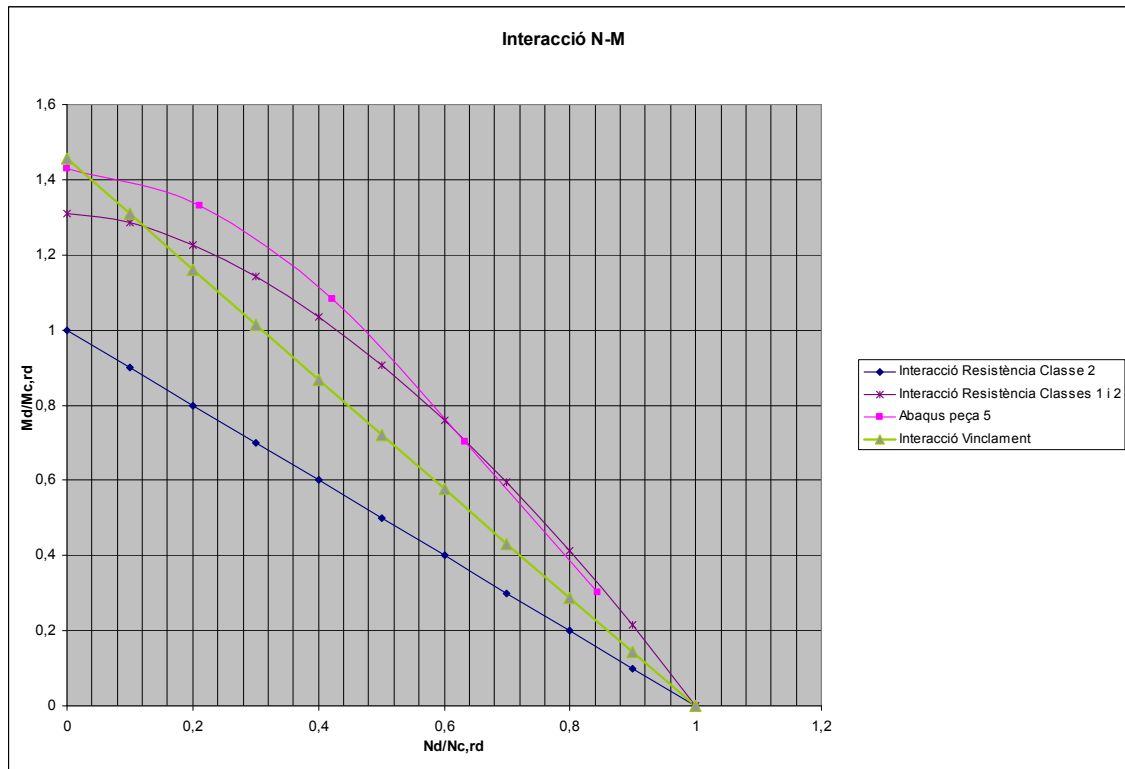


**Figura 4.6: Evolució de la reducció de V i d respecte els valors anterior i els màxims.**

En la figura 4.6 es veu que la evolució de V respecte el valor de  $V_{\max}$  té un caràcter lineal. Pel que fa als desplaçaments, l'evolució de la reducció de desplaçaments respecte al valor de  $d_{\max}$  és també lineal, però al inici té forma corba.

Si entenem que la pèrdua de ductilitat d'una peça està relacionada amb la reducció del desplaçament màxim al incrementar l'esforç a compressió en relació al valor del desplaçament màxim obtingut en el cas que la càrrega a compressió sigui nul·la, dimensionar la pila d'un pont integral de classe 2 entre el valor del 20% i del 40% de l'axil resistent seria òptim, ja que s'asseguraria que la reducció del  $d_{\max}$  seria petita e inferior del 50%.

En la figura 4.4, es presenten els resultats obtinguts en l'estudi de la interacció entre axil i flector. La figura inclou els criteris d'interacció axil – flector segon els criteris de resistència de la secció i segons criteris de vinclament i la corba de resultats obtinguts a partir del programa Abaqus. Pel que fa als criteris d'interacció axil – flector, s'han representat tant els casos de les classes 1 i 2 i el de la classe 3. Aquesta figura ajudarà a comparar els valors obtinguts amb el programa Abaqus i els criteris de les normatives.



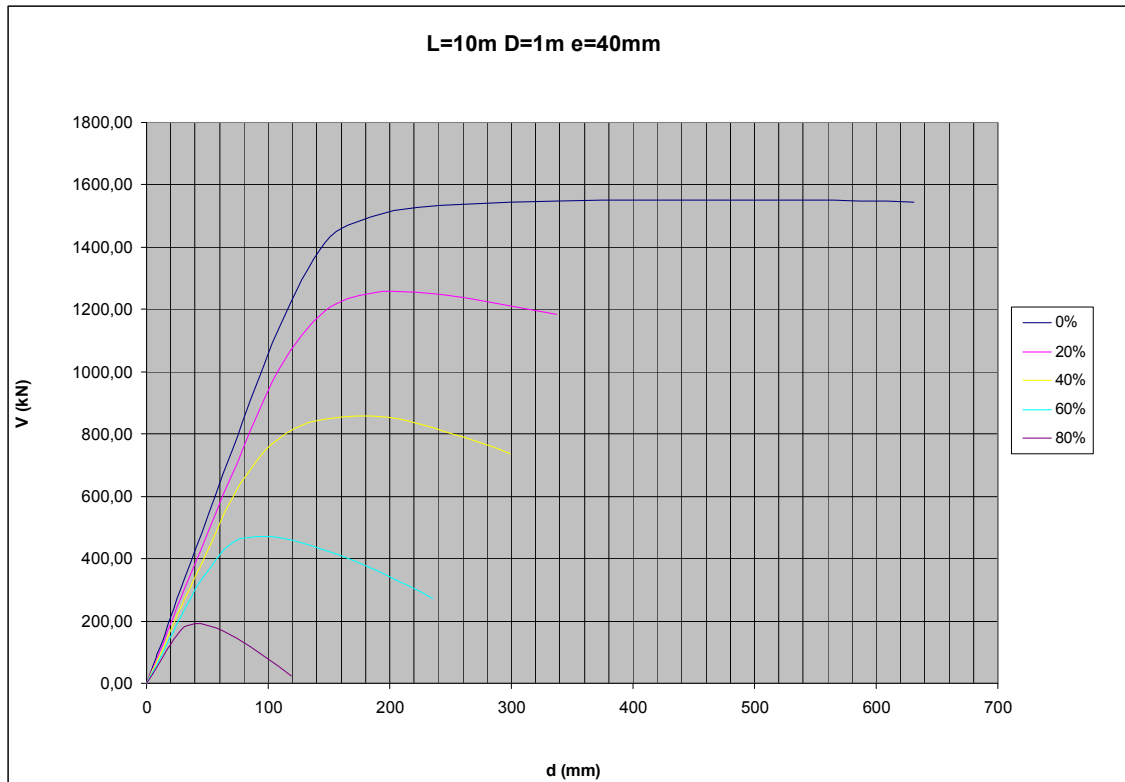
**Figura 4.7: Gràfiques d'interacció entre axil i flector per a la Peça 5.**

Segons les gràfiques de la figura 4.7, per a valors de l'axil aplicat entre el 0% i el 15% de l'axil resistent els criteris d'interacció estan limitats per efectes de resistència de la secció. Per valors d'axil aplicat superiors al 15% de l'axil resistent, els criteris d'interacció queden limitats per efectes de vinclament.

Com es pot observar en la figura 4.7, els esforços obtinguts amb l'Abaqus per la Peça 5 queda per sobre dels valors adoptats per al seu tipus de classe. Pel que fa a la normativa, els valors límits en la interacció axil – flector per efectes de resistència de la secció i per efectes de vinclament són força conservadors. Això implica que a l'hora de dimensionar una pila de pont integral de classe de secció 2, ens quedarà una reserva de resistència força considerable, sobretot per a valors baixos d'axil aplicat, aproximadament del 40%.

#### 4.2.3. Peces Classe 1

Per realitzar l'anàlisi de les peces de classe 1, s'ha considerat com a peça representativa la Peça 2. En la figura 4.8, es mostra el comportament de la peça 2 segons els diferents casos de càrrega.



**Figura 4.8: Representació gràfica del comportament de la Peça 2 per a les càrregues del 0%, 20%, 40%, 60% i 80%.**

Com s'observa en la taula 4.2, s'ha calculat el valor del moment màxim total obtingut amb Abaqus ( $M_{\text{màx},\text{total}}$ ). Aquest valor es pot comparar amb el valor resistent màxim teòric de la secció ( $M_{c,Rd}$ ), calculat mitjançant les expressions de la teoria de la resistència de materials. També es poden comparar amb els valors del màxim moment que resisteix la secció si es té en compte que actua alhora un axil. Aquest  $M_{\text{teòric}}$  es calcula amb les fórmules d'interacció axil – flector, com s'ha explicat al apartat 2.5.

A la taula 4.9, es troben els valors de la resistència de càlcul de la secció a flexió ( $M_{c,Rd}$ ), el moment màxim total obtingut amb Abaqus ( $M_{\text{màx},\text{total}}$ ) i el moment que resisteix la secció si es té en compte que actua alhora un axil ( $M_{\text{teòric}}$ ).

**Taula 4.9: Valors dels moments màxims teòrics comparats amb els valors obtinguts amb el programa Abaqus per a la Peça 2.**

Peça	Classe	$N_{Ed}/N_{c,Rd}$	$M_{\text{màx},\text{total}}$	$M_{\text{màx},\text{total}}/M_{c,Rd}$	$M_{\text{teòric}}$	$M_{\text{màx},\text{total}}/M_{\text{teòric}}$
2	Classe 1	-	15.520,00	1,09	14.207,57	1,09
2	Classe 1	0,20	14.527,05	0,88	12.363,47	1,17
2	Classe 1	0,40	11.657,61	0,60	9.028,02	1,29
2	Classe 1	0,60	6.579,91	0,33	5.779,83	1,14
2	Classe 1	0,80	3.336,84	0,13	2.618,93	1,27

A la taula 4.9, es pot veure que els moments màxims totals que resisteixen cadascuna de les peces es redueixen a mesura que l'axil aplicat augmenta. Aquest comportament és l'esperat per a la interacció axil – flector. Si es considera la relació entre el moment obtingut a partir del programa Abaqus i el valor del moment teòric obtingut de la

interacció axil – flector, es veu que el valor del programa Abaqus és superior al teòric. Això és indicatiu de que aquestes reduccions del flector proposades deixen del cantó de la seguretat en aquest tipus de classe.

A continuació es presenta la taula 4.10 que inclou els valors dels desplaçaments obtinguts amb el programa Abaqus per als valors de la màxima força horitzontal ( $d(V_{\max})$ ) resistida per la Peça 2 i els valors dels desplaçaments corresponents a la màxima força horitzontal resistida per la peça obtinguts mitjançant la teoria lineal ( $d_{\text{teòrica}}$ ) com s'explica a l'apartat 4.2.

**Taula 4.10: Valors dels desplaçaments teòrics comparats amb els valors obtinguts amb el programa Abaqus (en mm) per a la Peça 2.**

Peça	Classe	$N_{Ed}/N_{c,Rd}$	$d(V_{\max})$	$d_{\text{teòrica}}$	$d(V_{\max})/d_{\text{teòrica}}$
2	Classe 1	-	336,00	156,58	2,15
2	Classe 1	0,20	222,80	126,51	1,76
2	Classe 1	0,40	172,00	86,65	1,99
2	Classe 1	0,60	69,30	47,67	1,45
2	Classe 1	0,80	40,00	19,26	2,08

Com indica la taula 4.10, el valor del desplaçament de la força horitzontal màxima és sempre superior al valor teòric. Això mostra que s'ha perdut el comportament lineal de les peces, confirmant el caràcter dúctil d'aquestes. Es pot veure que els desplaçaments obtinguts mitjançant el programa Abaqus augmenten més en relació als valors de la teoria lineal a mesura que l'axil aplicat augmenta. Això es comprova observant els pendents obtinguts per a cada cas de càrrega en la figura 4.8. A mesura que l'axil aplicat augmenta, el pendent del tram lineal disminueix, per tant s'allunya cada cop més de la teoria lineal.

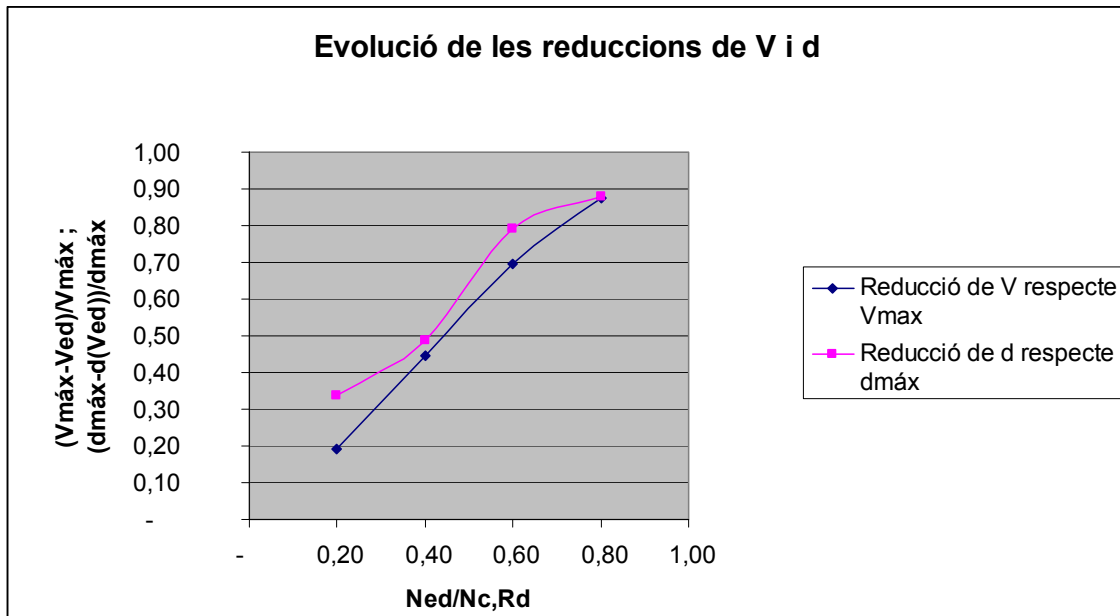
A continuació es presenta la taula 4.11. on es troben els valors utilitzats en l'anàlisi del comportament sota càrrega de les peces. S'inclouen les reduccions de forces i desplaçaments que es produeixen en funció de cada cas de càrrega i en funció del valor màxim obtingut.

**Taula 4.11: Valors utilitzats per a l'estudi del comportament sota càrrega de les peces de classe 1.**

Peça	Classe	$N_{Ed}/N_{c,Rd}$	$\Delta V/V_{\text{ant}}$	$\Delta V/V_{\text{max}}$	$\Delta d/d_{\text{ant}}$	$\Delta d/d_{\text{max}}$
2	Classe 1	-				
2	Classe 1	0,20	0,19	0,19	0,34	0,34
2	Classe 1	0,40	0,32	0,45	0,23	0,49
2	Classe 1	0,60	0,45	0,70	0,60	0,79
2	Classe 1	0,80	0,60	0,88	0,42	0,88

A la taula 4.11 s'observa que a mesura que l'axil augmenta, la reducció de la força horitzontal màxima i el seu desplaçament corresponent respecte el valor anterior ( $\Delta V/V_{\text{ant}}$  i  $\Delta d/d_{\text{ant}}$ ) és cada cop més important, arribant-se a reduir un 60% entre els valors del 60% i el 80% del  $N_{c,Rd}$ . Si es miren les reduccions d'axil i desplaçament respecte als valors màxims ( $\Delta V/V_{\text{max}}$  i  $\Delta d/d_{\text{max}}$ ), es comprovarà que en el cas de la força horitzontal la reducció és aproximadament del 90%. Pel que fa als desplaçaments, és casi del 90%.

En la figura 4.9 es presenten les evolucions de les reduccions de forces i desplaçaments per la Peça 2 representativa de les peces de classe 1.

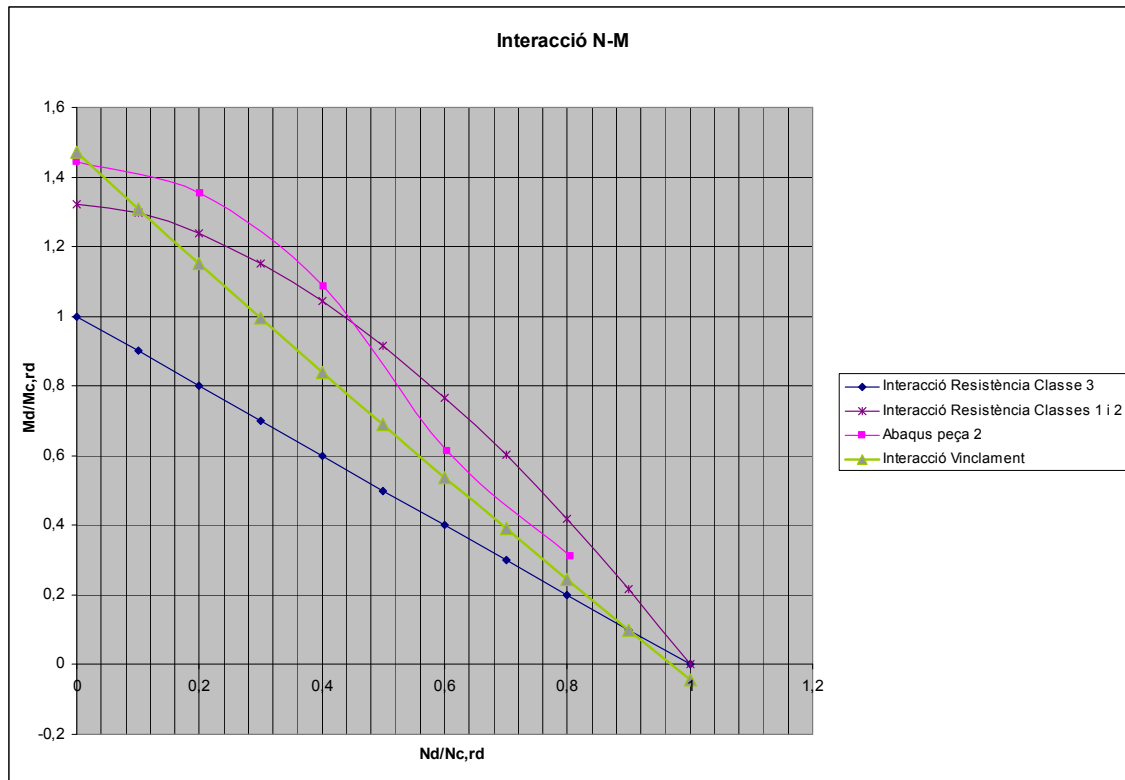


**Figura 4.9: Evolució de la reducció de V i d respecte els valors anterior i els màxims de la Peça 2.**

En la figura 4.6 es veu que la evolució de V respecte el valor de  $V_{m\grave{a}x}$  té un caràcter lineal. Pel que fa als desplaçaments, l'evolució de la reducció de desplaçaments respecte al valor de  $d_{m\grave{a}x}$  no és lineal.

Si entenem que la pèrdua de ductilitat d'una peça està relacionada amb la reducció del desplaçament màxim al incrementar l'esforç a compressió en relació al valor del desplaçament màxim obtingut en el cas que la càrrega a compressió sigui nul·la, dimensionar la pila d'un pont integral de classe 1 entre el valor del 20% i del 40% i del 60% i del 80% de l'axil resistent seria òptim, ja que no es veuria molt afectada per la pèrdua de ductilitat. Si es dimensionés una pila de pont integral per sota del 40% de l'axil resistent, s'asseguraria una reducció de ductilitat inferior al 50%.

En la figura 4.10, es presenten els resultats obtinguts en l'estudi de la interacció entre axil i flector. La figura inclou els criteris d'interacció axil – flector segon els criteris de resistència de la secció i segons criteris de vinclament i la corba de resultats obtinguts a partir del programa Abaqus. Pel que fa als criteris d'interacció axil – flector, s'han representat tant els casos de les classes 1 i 2 i el de la classe 3. Aquesta figura ajudarà a comparar els valors obtinguts amb el programa Abaqus i els criteris de les normatives.

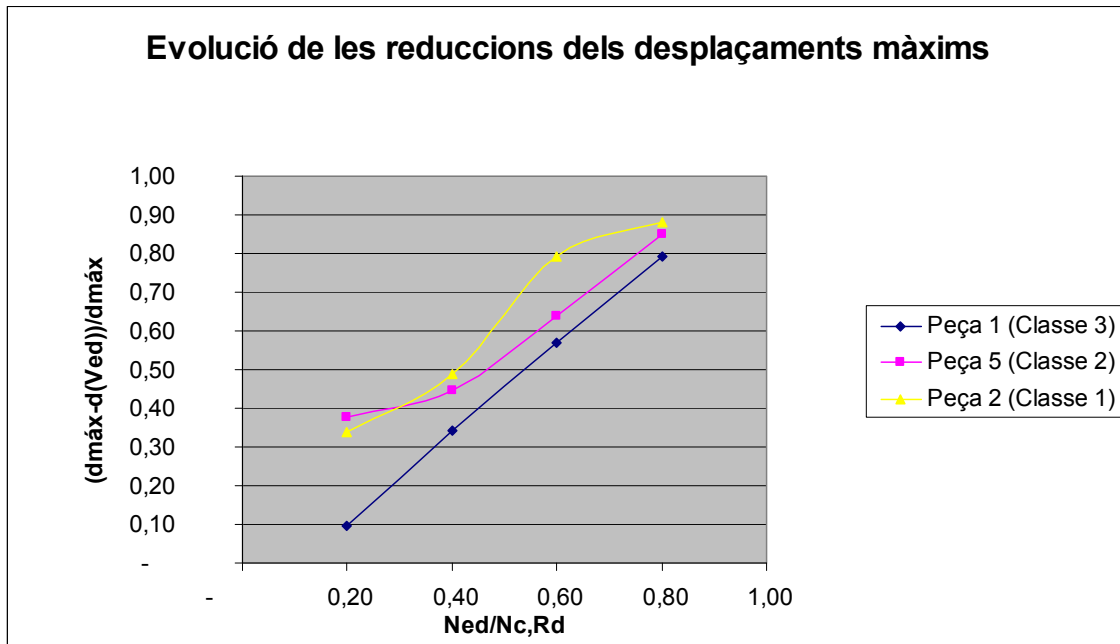


**Figura 4.10: Gràfiques d'interacció entre axil i flector per a la Peça 2.**

Segons les gràfiques de la figura 4.10, per a valors de l'axil aplicat entre el 0% i el 15% de l'axil resistent els criteris d'interacció estan limitats per efectes de resistència de la secció. Per valors d'axil aplicat superiors al 15% de l'axil resistent, els criteris d'interacció queden limitats per efectes de vinclament.

Com es pot observar en la figura 4.10, els esforços obtinguts amb l'Abaqus per la Peça 2 queda per sobre dels valors adoptats per al seu tipus de classe. Pel que fa a la normativa, els valors límits en la interacció axil – flector per efectes de resistència de la secció i per efectes de vinclament són força conservatius. Això implica que al dimensionar una pila de pont integral de classe de secció 1, ens quedarà una reserva de resistència força considerable, sobretot per a valors baixos d'axil aplicat, aproximadament del 40%.

A continuació, es presenten a la figura 4.11 les evolucions de les reduccions de dels desplaçaments per a les peces que s'han analitzat als apartats 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 (Peces 1, 2 i 5) representatives de les classes 1, 2 i 3.



**Figura 4.11: Representació de les evolucions dels desplaçaments per a les peces representatives de les classes 1, 2 i 3.**

La figura 4.11 evidencia que la reducció del desplaçament màxim afecta més a les peces de classe 1 i 2 que a les peces de classe 3. Evidentment això no és indicador de que les peces de classe 3 siguin més dúctils, ja que aquests resultats no són absoluts, sinó relatius al valor màxim.

En tots els cassos succeeix que si es dimensiona la pila d'un pont integral, en servei, per sota del 40% del valor de l'axil resistent ( $N_{c,Rd}$ ) es pot assegurar que la reducció del desplaçament màxim és inferior al 50%. Per tant, seria convenient que les piles d'un pont integral treballassin a axils inferiors al 40% de l'axil resistent.

També es pot observar que les esvelteses utilitzades per a les peces sota estudi, que corresponen a esvelteses habituals en piles de ponts integrals, no juguen un paper important en la definició de la ductilitat.



## 5. Conclusions

En aquest apartat es recullen totes les conclusions obtingudes en l'estudi dels resultats obtinguts a l'anàlisi de Buckle i l'anàlisi no lineal.

Pel que fa a l'estudi del vinclament (Anàlisi de Buckle), s'ha arribat a la conclusió que en les peces de classe 1 (Peces 2 i 3) els valors de la longitud crítica és molt semblant a la dels casos canònics ( $k = 0,7$ ), ja que es produeix vinclament global. És a dir, la càrrega crítica d'inestabilitat obtinguda amb el model d'elements finits coincideix amb la càrrega crítica de la teoria clàssica d'Euler per a una biga amb les mateixes condicions de contorn. En canvi, en general, en les peces de classe 3 (Peces 1, 4 i 6), es pot afirmar que quan es produeix interacció d'inestabilitats locals i globals els valors de la longitud crítica no coincideix amb els casos canònics (Valors de  $k$  entre 0,88 i 1,64). Pel que fa a les peces de classe 2 (Peces 5 i 7), s'observa que les més esveltes (Peça 7) pateixen vinclament global i la seva longitud crítica coincideix amb els casos canònics. Pel que fa a les menys esveltes (Peça 5) es produeix vinclament local i tal i com succeeix en les peces 1, 4 i 6 i la longitud crítica obtinguda no coincideix amb la dels casos canònics.

Els resultats de l'anàlisi no lineal han proporcionat conclusions generals i conclusions en funció de la classe de secció. Tot seguit es recullen les conclusions obtingudes en funció de la classe de secció.

### *Classe 3:*

Els moments màxims obtinguts en el anàlisi no lineal deixen els criteris adoptats en la interacció axil – flector del cantó de la seguretat. Es confirma el caràcter dúctil de les peces d'aquesta classe de secció. La reducció del desplaçament màxim té forma lineal i, per valors inferiors al 50% de l'axil resistent, s'assegura que, aquesta reducció és inferior al 50%. De totes les classes analitzades, la reducció del desplaçament màxim (reducció de la ductilitat) és la més baixa.

### *Classe 2:*

Els moments màxims obtinguts en el anàlisi no lineal deixen els criteris adoptats en la interacció axil – flector del cantó de la seguretat. Es confirma el caràcter dúctil de les peces d'aquesta classe de secció. La reducció del desplaçament màxim té forma quasi lineal i, per valors compresos entre el 20% i el 40% de l'axil resistent, s'assegura que, aquesta reducció és inferior al 50%. De totes les classes analitzades, la reducció del desplaçament màxim queda entre les classes 3 (més baixes) i classes 1 (més altes).

### *Classe 1:*

Els moments màxims obtinguts en el anàlisi no lineal deixen els criteris adoptats en la interacció axil – flector del cantó de la seguretat. Es confirma el caràcter dúctil de les peces d'aquesta classe de secció. La reducció del desplaçament màxim té forma lineal i, per valors inferiors al 40% de l'axil resistent, s'assegura que, aquesta reducció és inferior al 50%. De totes les classes analitzades, aquesta és la que pateix la reducció del desplaçament màxim més elevat.

Les conclusions generals obtingudes per a les piles de ponts integrals són:

En ponts integrals, en servei, les piles no haurien de treballar a axils superiors al 40% del seu axil resistent, per assegurar que la reducció del desplaçament màxim sigui inferior del 50%.

Les esvelteses utilitzades, que corresponen a esvelteses habituals en el disseny de piles de ponts integrals, no juguen un paper important en la definició de la ductilitat.

## **6. Perspectives futures**

En base als resultats obtinguts en aquest treball, seria interessant realitzar un estudi més detallat, amb un major nombre de peces, on es considerin més diàmetres, longituds i espessors, per veure com influeixen aquests paràmetres en el comportament global de l'estructura i estudiar també altres condicions de contorn possibles en el disseny de piles de ponts integrals, com poden ser les piles de pont encastades en els seus dos extrems, permetent el desplaçament relatiu entre aquests extrems

.

## **7. Referències bibliogràfiques**

IAP-98 (1998) "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera". Ministerio de Fomento. Espanya.

IAPF-07 (2007) "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril". Ministerio de Fomento. Espanya.

GCPIIC (2000) "Guía para la concepción de puentes integrales en carreteras". Ministerio de Fomento. Espanya.

EHE-08 (2008) "Instrucción de Hotmigón Estructural" Ministerio de Fomento. Espanya.

HMSO (1989) "Technical memorandum on expansión joints for use in highway bridge decks" Her Majesty's Stationery Office. Regne Unit.

AASHTO (1992) "LRFD Bridge Design Specifications" American Association of State Highway and Transportation Officials. Estats Units d'Amèrica.

UNE-EN 1993-1-1 AENOR Eurocódigo 3 (2008), "Proyecto de estructuras de acero. Reglas generales y reglas para edificios"

CTE SE-A (2006) "Código técnico de la edificación. Documento básico. Seguridad Estructural Acero". Ministerio de Vivienda. Espanya.

EAE – doc 0. (2004) "Instrucción Acero Estructural". Ministerio de fomento. Espanya.

## 8. Annex

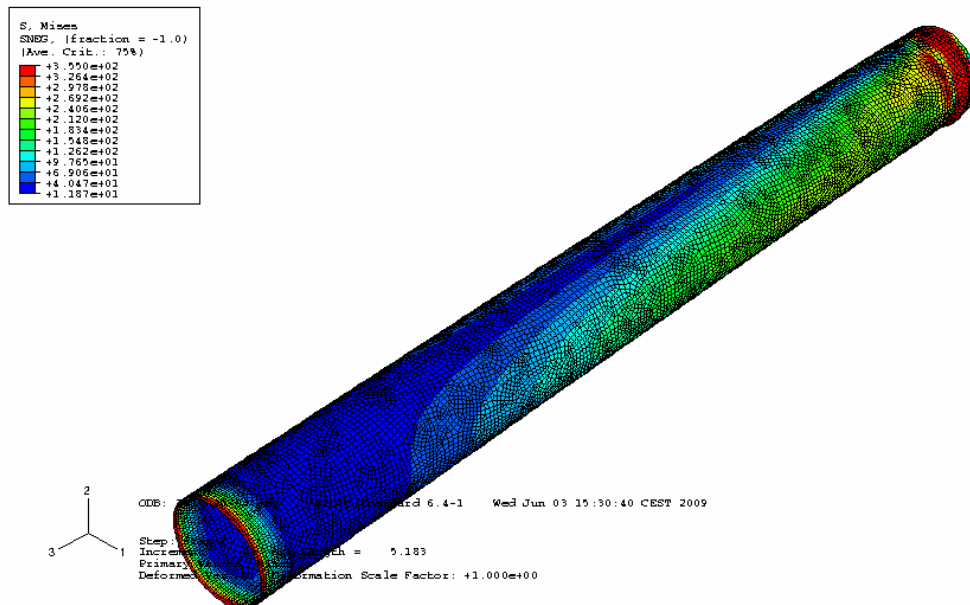
En aquest apartat es presenten els resultats obtinguts mitjançant el programa Abaqus de l'anàlisi no lineal de les 7 peces sota estudi.

### 8.1. Resultats anàlisi no lineal.

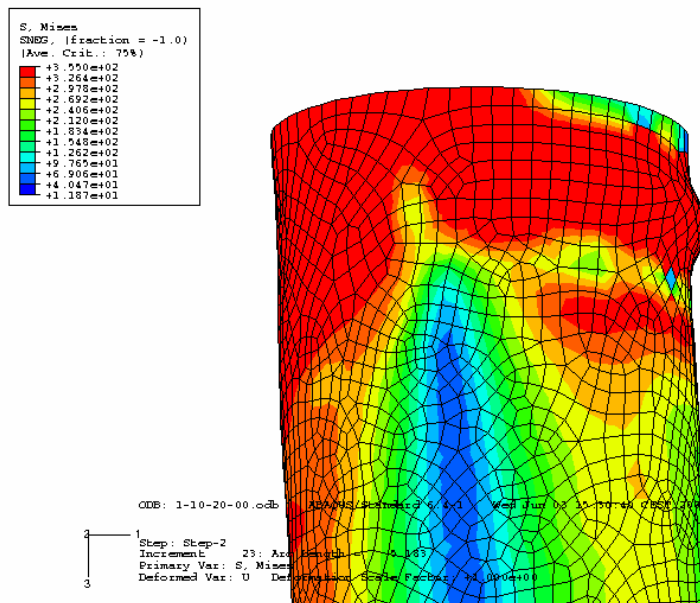
Peça 1:  
Càrrega del 0 %:

**Taula 7.1: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 0						
1-10-20-00						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	4,95	#DIV/0!
0,05	25443,70	5,00	25,44	5,09	4,95	1,03
0,10	50887,40	10,00	50,89	5,09	4,95	1,03
0,18	89052,90	17,50	89,05	5,09	4,95	1,03
0,29	146300,00	28,75	146,30	5,09	4,95	1,03
0,46	232169,00	45,63	232,17	5,09	4,95	1,03
0,71	360721,00	70,94	360,72	5,09	4,95	1,03
1,09	552357,00	108,91	552,36	5,07	4,95	1,02
1,23	646693,00	123,15	646,69	5,25	4,95	1,06
1,37	699634,00	137,38	699,63	5,09	4,95	1,03
1,52	724501,00	151,62	724,50	4,78	4,95	0,97
1,66	735211,00	165,86	735,21	4,43	4,95	0,90
1,80	739027,00	180,10	739,03	4,10	4,95	0,83
1,94	739260,00	194,34	739,26	3,80	4,95	0,77
2,09	737409,00	208,57	737,41	3,54	4,95	0,71
2,30	732055,00	229,93	732,06	3,18	4,95	0,64
2,62	719559,00	261,97	719,56	2,75	4,95	0,55
2,94	703858,00	294,00	703,86	2,39	4,95	0,48
3,26	687084,00	326,04	687,08	2,11	4,95	0,43
3,58	670778,00	358,08	670,78	1,87	4,95	0,38
3,90	655689,00	390,11	655,69	1,68	4,95	0,34
4,22	641752,00	422,15	641,75	1,52	4,95	0,31
4,70	622459,00	470,20	622,46	1,32	4,95	0,27
5,18	605240,00	518,26	605,24	1,17	4,95	0,24
5,66	589934,00	566,31	589,93	1,04	4,95	0,21
6,14	575883,00	614,37	575,88	0,94	4,95	0,19
6,86	557357,00	686,45	557,36	0,81	4,95	0,16
7,59	541119,00	758,53	541,12	0,71	4,95	0,14
8,31	526539,00	830,61	526,54	0,63	4,95	0,13
9,03	513695,00	902,69	513,70	0,57	4,95	0,11
9,75	502351,00	974,77	502,35	0,52	4,95	0,10
10,47	492059,00	1046,85	492,06	0,47	4,95	0,09
11,19	482626,00	1118,93	482,63	0,43	4,95	0,09
11,91	474010,00	1191,02	474,01	0,40	4,95	0,08
12,63	466083,00	1263,10	466,08	0,37	4,95	0,07
13,35	458901,00	1335,18	458,90	0,34	4,95	0,07
14,07	452461,00	1407,26	452,46	0,32	4,95	0,06
14,79	446706,00	1479,34	446,71	0,30	4,95	0,06
15,51	441602,00	1551,42	441,60	0,28	4,95	0,06
16,24	437083,00	1623,50	437,08	0,27	4,95	0,05
16,96	433068,00	1695,58	433,07	0,26	4,95	0,05



**Figura 7.1: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 0%.**

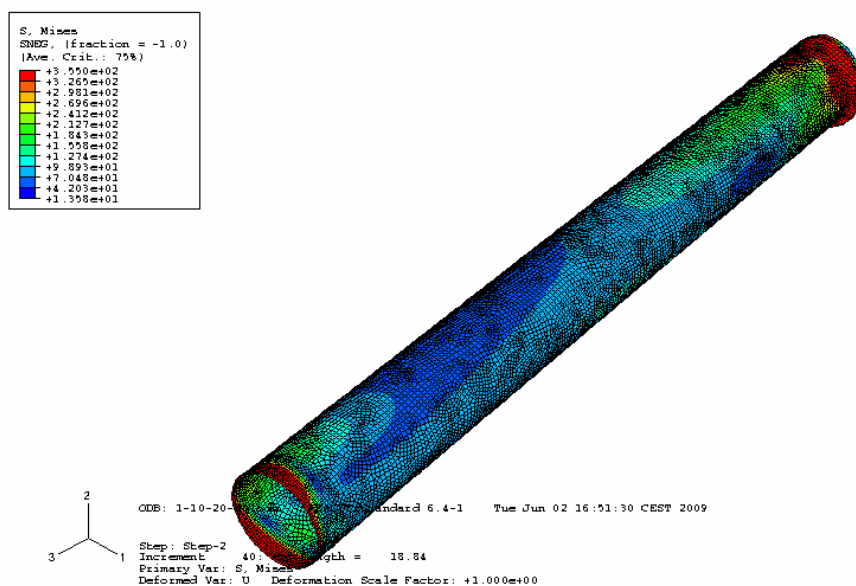


**Figura 7.2: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 0%.**

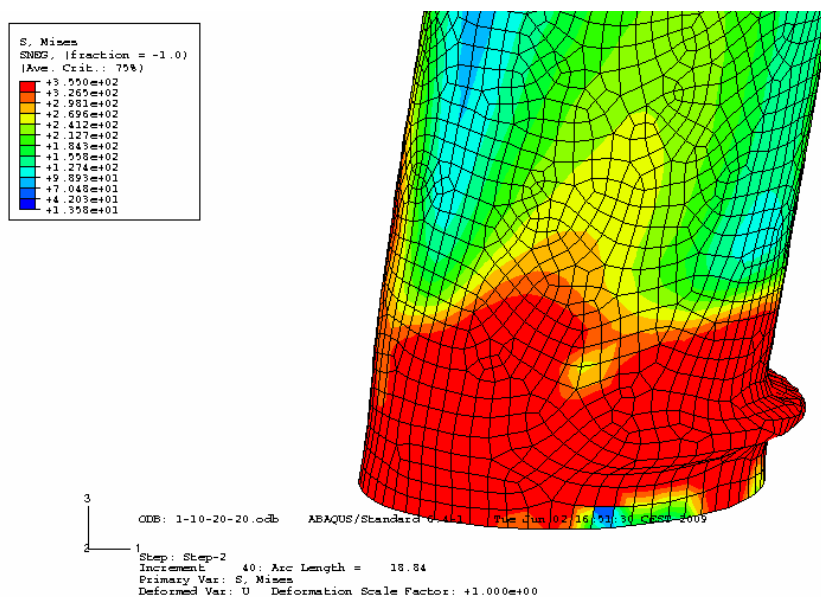
Càrrega del 20 %:

**Taula 7.2: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 4461,06 kN						
1-10-20-20						
x	b	d (mm)	V(kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	2,93	0,00	0,00	#DIV/0!	4,95	#DIV/0!
0,05	22832,10	5,00	22,83	4,57	4,95	0,92
0,10	45661,30	10,00	45,66	4,57	4,95	0,92
0,18	79905,00	17,50	79,91	4,57	4,95	0,92
0,29	131270,00	28,75	131,27	4,57	4,95	0,92
0,46	208311,00	45,63	208,31	4,57	4,95	0,92
0,71	323568,00	70,94	323,57	4,56	4,95	0,92
1,09	487807,00	108,91	487,81	4,48	4,95	0,90
1,28	543929,00	127,89	543,93	4,25	4,95	0,86
1,47	582076,00	146,88	582,08	3,96	4,95	0,80
1,66	601165,00	165,86	601,17	3,62	4,95	0,73
1,85	604714,00	184,84	604,71	3,27	4,95	0,66
2,04	598521,00	203,83	598,52	2,94	4,95	0,59
2,23	586955,00	222,81	586,96	2,63	4,95	0,53
2,42	571966,00	241,80	571,97	2,37	4,95	0,48
2,61	554818,00	260,78	554,82	2,13	4,95	0,43
2,89	525422,00	289,26	525,42	1,82	4,95	0,37
3,18	494284,00	317,73	494,28	1,56	4,95	0,31
3,46	462399,00	346,21	462,40	1,34	4,95	0,27
3,75	431333,00	374,69	431,33	1,15	4,95	0,23
4,03	401259,00	403,16	401,26	1,00	4,95	0,20
4,32	372245,00	431,64	372,25	0,86	4,95	0,17
4,74	331017,00	474,36	331,02	0,70	4,95	0,14
5,17	292258,00	517,07	292,26	0,57	4,95	0,11
5,60	255633,00	559,79	255,63	0,46	4,95	0,09
6,03	220788,00	602,50	220,79	0,37	4,95	0,07
6,67	171504,00	666,57	171,50	0,26	4,95	0,05
7,31	124943,00	730,65	124,94	0,17	4,95	0,03
7,95	80745,90	794,72	80,75	0,10	4,95	0,02
8,59	38559,60	858,79	38,56	0,04	4,95	0,01
9,23	-2005,06	922,86	-2,01	0,00	4,95	0,00
10,19	-60383,60	1018,97	-60,38	-0,06	4,95	-0,01
11,15	-116394,00	1115,08	-116,39	-0,10	4,95	-0,02
12,11	-170427,00	1211,19	-170,43	-0,14	4,95	-0,03
13,07	-222842,00	1307,29	-222,84	-0,17	4,95	-0,03
14,03	-273935,00	1403,40	-273,94	-0,20	4,95	-0,04
15,00	-323821,00	1499,51	-323,82	-0,22	4,95	-0,04
15,96	-372669,00	1595,62	-372,67	-0,23	4,95	-0,05
16,92	-420666,00	1691,73	-420,67	-0,25	4,95	-0,05
17,88	-467962,00	1787,84	-467,96	-0,26	4,95	-0,05
18,84	-514644,00	1883,95	-514,64	-0,27	4,95	-0,06



**Figura 7.3: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 20%.**



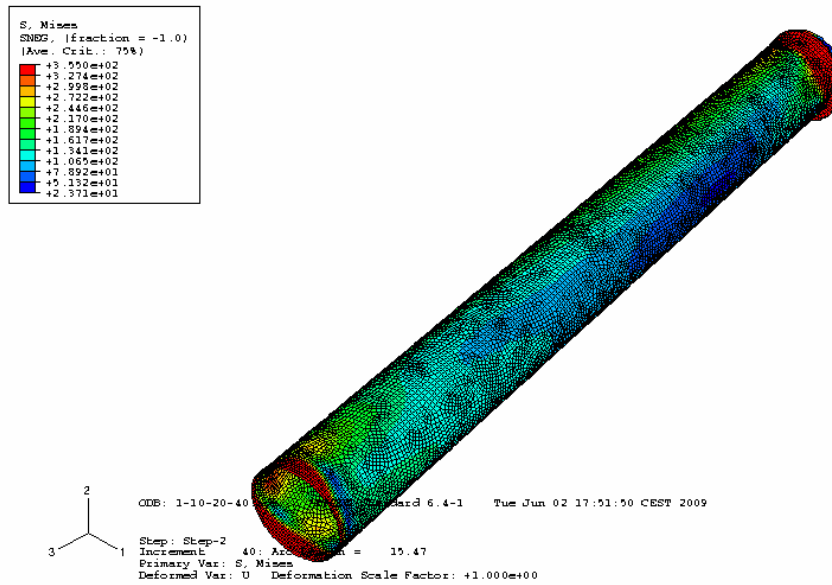
**Figura 7.4: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 20%.**



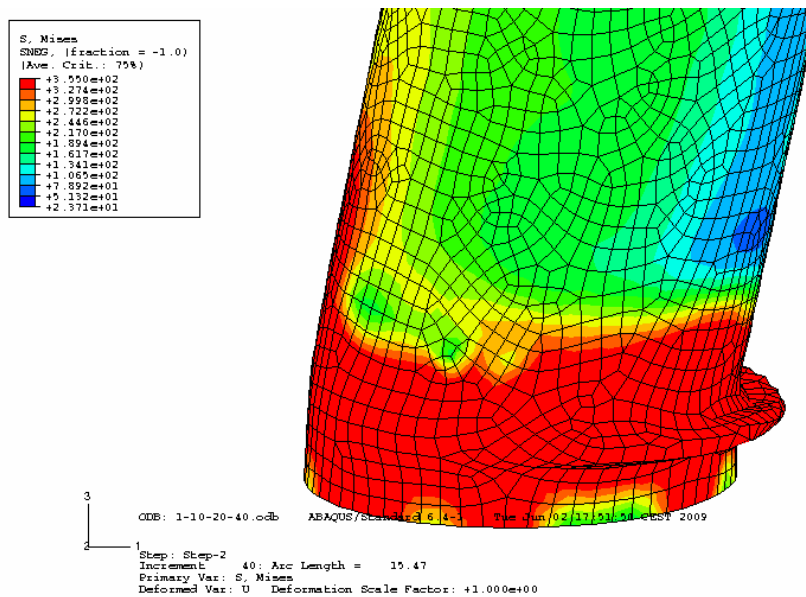
Càrrega del 40 %:

**Taula 7.3: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 8922,11						
1-10-20-40						
x	b	d (mm)	V(kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	6,08	0,00	0,01	#DIV/0!	4,95	#DIV/0!
0,05	20210,60	5,00	20,21	4,04	4,95	0,82
0,10	40415,20	10,00	40,42	4,04	4,95	0,82
0,18	70721,90	17,50	70,72	4,04	4,95	0,82
0,29	116181,00	28,75	116,18	4,04	4,95	0,82
0,46	184275,00	45,63	184,28	4,04	4,95	0,82
0,71	285755,00	70,94	285,76	4,03	4,95	0,81
0,90	367379,00	89,92	367,38	4,09	4,95	0,83
1,09	401334,00	108,91	401,33	3,69	4,95	0,74
1,28	407247,00	127,89	407,25	3,18	4,95	0,64
1,47	389922,00	146,88	389,92	2,65	4,95	0,54
1,66	351890,00	165,86	351,89	2,12	4,95	0,43
1,85	301461,00	184,84	301,46	1,63	4,95	0,33
2,04	246743,00	203,83	246,74	1,21	4,95	0,24
2,23	192157,00	222,81	192,16	0,86	4,95	0,17
2,42	139605,00	241,80	139,61	0,58	4,95	0,12
2,61	89457,70	260,78	89,46	0,34	4,95	0,07
2,80	41984,20	279,77	41,98	0,15	4,95	0,03
3,08	-25160,00	308,24	-25,16	-0,08	4,95	-0,02
3,51	-118249,00	350,96	-118,25	-0,34	4,95	-0,07
3,94	-204079,00	393,67	-204,08	-0,52	4,95	-0,10
4,36	-284452,00	436,39	-284,45	-0,65	4,95	-0,13
4,79	-360527,00	479,10	-360,53	-0,75	4,95	-0,15
5,22	-433383,00	521,82	-433,38	-0,83	4,95	-0,17
5,65	-503721,00	564,53	-503,72	-0,89	4,95	-0,18
6,07	-571923,00	607,25	-571,92	-0,94	4,95	-0,19
6,50	-638425,00	649,96	-638,43	-0,98	4,95	-0,20
7,14	-735607,00	714,03	-735,61	-1,03	4,95	-0,21
7,78	-830416,00	778,11	-830,42	-1,07	4,95	-0,22
8,42	-923231,00	842,18	-923,23	-1,10	4,95	-0,22
9,06	-1014510,00	906,25	-1014,51	-1,12	4,95	-0,23
9,70	-1104540,00	970,32	-1104,54	-1,14	4,95	-0,23
10,34	-1193570,00	1034,39	-1193,57	-1,15	4,95	-0,23
10,98	-1281780,00	1098,47	-1281,78	-1,17	4,95	-0,24
11,63	-1369360,00	1162,54	-1369,36	-1,18	4,95	-0,24
12,27	-1456510,00	1226,61	-1456,51	-1,19	4,95	-0,24
12,91	-1543360,00	1290,68	-1543,36	-1,20	4,95	-0,24
13,55	-1630010,00	1354,76	-1630,01	-1,20	4,95	-0,24
14,19	-1716570,00	1418,83	-1716,57	-1,21	4,95	-0,24
14,83	-1803210,00	1482,90	-1803,21	-1,22	4,95	-0,25
15,47	-1890170,00	1546,97	-1890,17	-1,22	4,95	-0,25



**Figura 7.5: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 40%.**

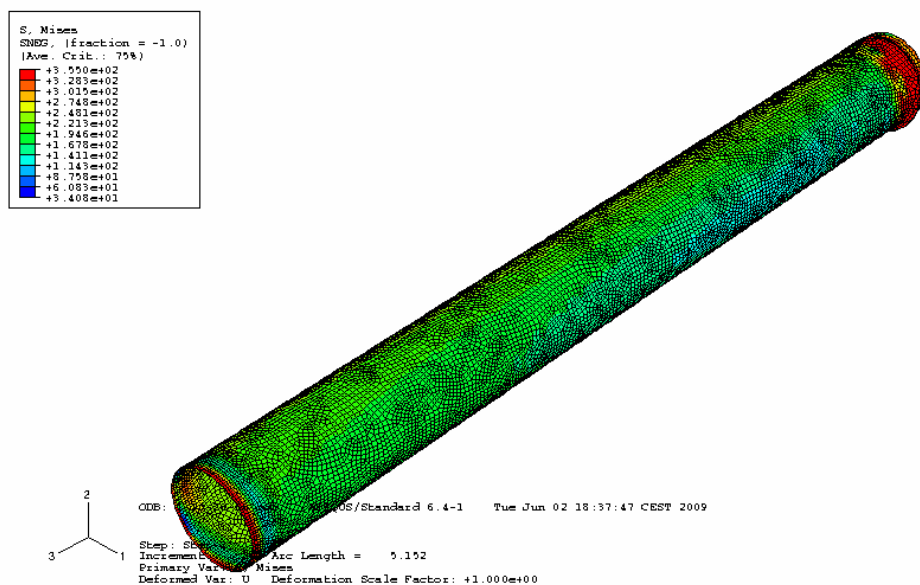


**Figura 7.6: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 40%.**

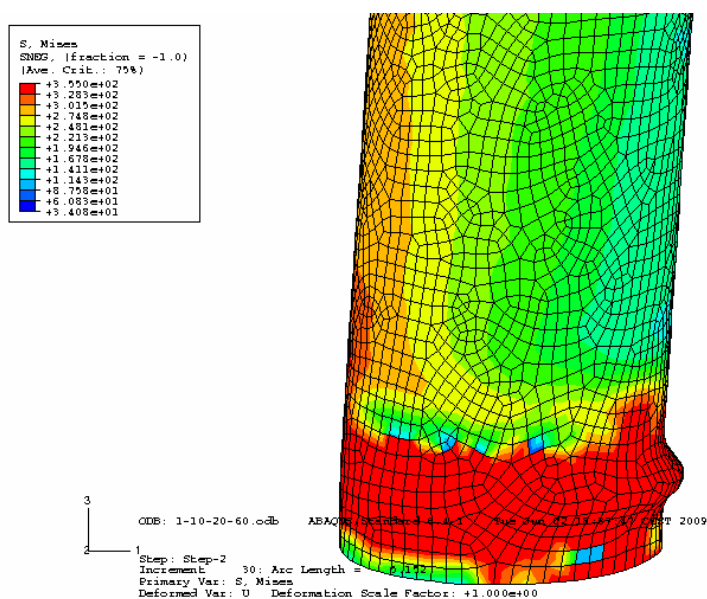
Càrrega del 60 %:

**Taula 7.4: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 13383 kN						
1-10-20-60						
x	b	d (mm)	V(kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	9,48	0,00	0,01	#DIV/0!	4,95	#DIV/0!
0,05	17578,90	5,00	17,58	3,52	4,95	0,71
0,10	35148,50	10,00	35,15	3,51	4,95	0,71
0,18	61496,20	17,50	61,50	3,51	4,95	0,71
0,29	100948,00	28,75	100,95	3,51	4,95	0,71
0,46	159780,00	45,63	159,78	3,50	4,95	0,71
0,58	209431,00	58,28	209,43	3,59	4,95	0,73
0,71	227028,00	70,94	227,03	3,20	4,95	0,65
0,84	227767,00	83,59	227,77	2,72	4,95	0,55
0,96	216477,00	96,25	216,48	2,25	4,95	0,45
1,09	194054,00	108,91	194,05	1,78	4,95	0,36
1,22	162297,00	121,56	162,30	1,34	4,95	0,27
1,34	123135,00	134,22	123,14	0,92	4,95	0,19
1,47	77879,80	146,88	77,88	0,53	4,95	0,11
1,60	28794,90	159,53	28,79	0,18	4,95	0,04
1,72	-21513,80	172,19	-21,51	-0,12	4,95	-0,03
1,85	-71302,30	184,84	-71,30	-0,39	4,95	-0,08
1,98	-119644,00	197,50	-119,64	-0,61	4,95	-0,12
2,10	-166446,00	210,16	-166,45	-0,79	4,95	-0,16
2,29	-233299,00	229,14	-233,30	-1,02	4,95	-0,21
2,48	-296754,00	248,13	-296,75	-1,20	4,95	-0,24
2,67	-356847,00	267,11	-356,85	-1,34	4,95	-0,27
2,96	-442047,00	295,59	-442,05	-1,50	4,95	-0,30
3,38	-561155,00	338,30	-561,16	-1,66	4,95	-0,34
3,81	-672778,00	381,02	-672,78	-1,77	4,95	-0,36
4,24	-778930,00	423,73	-778,93	-1,84	4,95	-0,37
4,66	-881614,00	466,45	-881,61	-1,89	4,95	-0,38
5,09	-983946,00	509,16	-983,95	-1,93	4,95	-0,39
5,12	-986376,00	511,83	-986,38	-1,93	4,95	-0,39
5,15	-988166,00	514,50	-988,17	-1,92	4,95	-0,39
5,15	-988712,00	515,17	-988,71	-1,92	4,95	-0,39



**Figura 7.7: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 60%.**

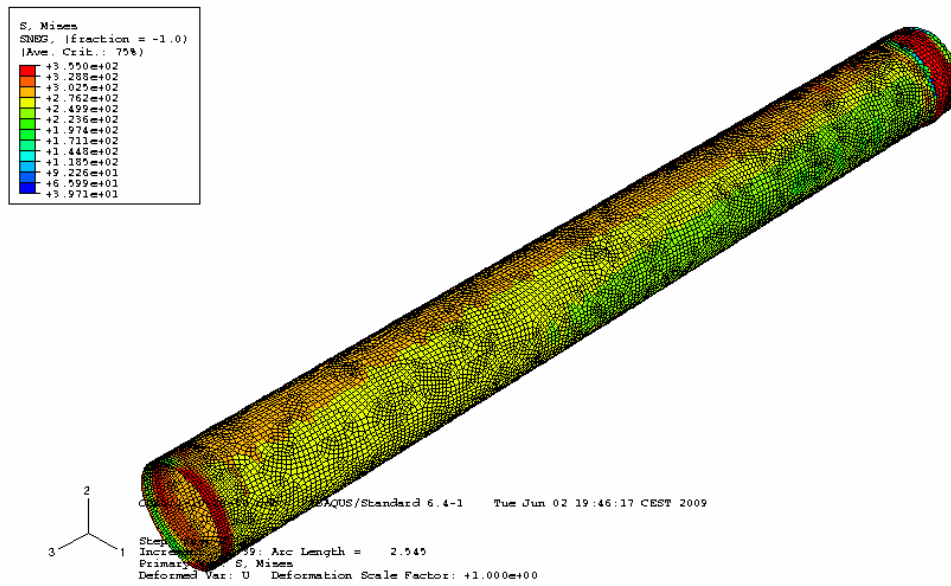


**Figura 7.8: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 60%.**

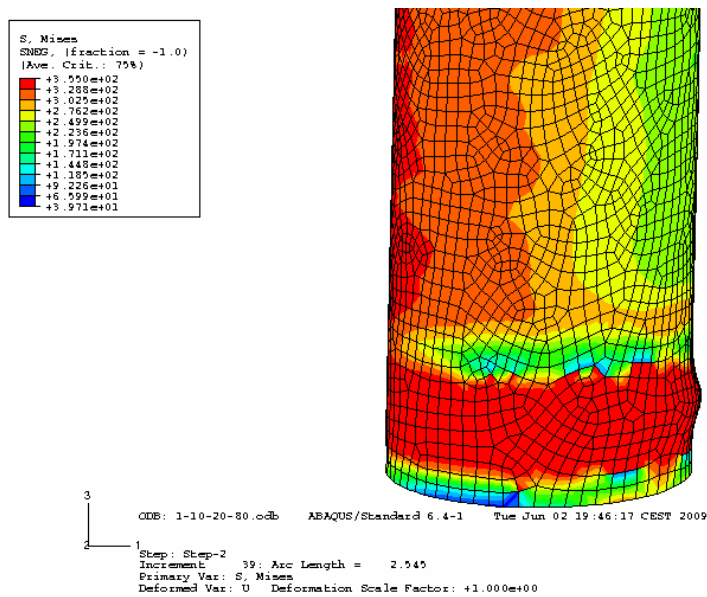
Càrrega del 80 %:

**Taula 7.5: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

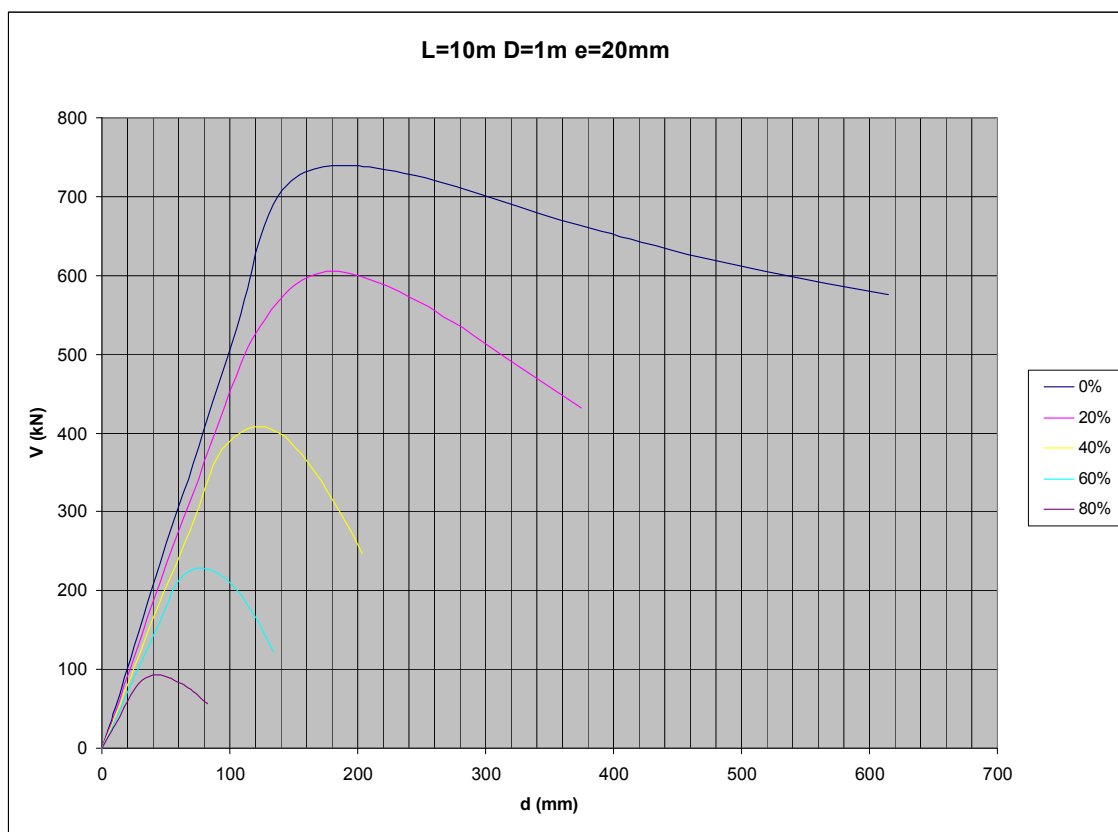
Ned = 17844 kN						
1-10-20-80						
x	b	d (mm)	V(kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	13,03	0,00	0,01	#iDIV/0!	4,95	#iDIV/0!
0,05	14900,00	5,00	14,90	2,98	4,95	0,60
0,10	29800,00	10,00	29,80	2,98	4,95	0,60
0,18	52000,00	17,50	52,00	2,97	4,95	0,60
0,29	82300,00	28,80	82,30	2,86	4,95	0,58
0,40	92900,00	40,00	92,90	2,32	4,95	0,47
0,51	90400,00	51,30	90,40	1,76	4,95	0,36
0,57	86600,00	56,90	86,60	1,52	4,95	0,31
0,63	81700,00	62,50	81,70	1,31	4,95	0,26
0,65	78800,00	65,30	78,80	1,21	4,95	0,24
0,68	75700,00	68,10	75,70	1,11	4,95	0,22
0,71	72300,00	70,90	72,30	1,02	4,95	0,21
0,74	68700,00	73,80	68,70	0,93	4,95	0,19
0,77	64800,00	76,60	64,80	0,85	4,95	0,17
0,79	60700,00	79,40	60,70	0,76	4,95	0,15
0,82	56300,00	82,20	56,30	0,68	4,95	0,14
0,85	51600,00	85,00	51,60	0,61	4,95	0,12
0,88	46600,00	87,80	46,60	0,53	4,95	0,11
0,91	41400,00	90,60	41,40	0,46	4,95	0,09
0,93	35900,00	93,40	35,90	0,38	4,95	0,08
0,96	30200,00	96,30	30,20	0,31	4,95	0,06
1,00	21200,00	100,47	21,20	0,21	4,95	0,04
1,07	6680,00	106,80	6,68	0,06	4,95	0,01
1,16	-17200,00	116,29	-17,20	-0,15	4,95	-0,03
1,26	-43200,00	125,78	-43,20	-0,34	4,95	-0,07
1,35	-71000,00	135,27	-71,00	-0,52	4,95	-0,11
1,50	-116000,00	149,51	-116,00	-0,78	4,95	-0,16
1,64	-164000,00	163,75	-164,00	-1,00	4,95	-0,20
1,78	-214000,00	177,99	-214,00	-1,20	4,95	-0,24
1,92	-264000,00	192,23	-264,00	-1,37	4,95	-0,28
2,06	-312000,00	206,47	-312,00	-1,51	4,95	-0,31
2,21	-360000,00	220,70	-360,00	-1,63	4,95	-0,33
2,42	-429000,00	242,06	-429,00	-1,77	4,95	-0,36
2,50	-469000,00	250,07	-469,00	-1,88	4,95	-0,38
2,51	-472000,00	250,82	-472,00	-1,88	4,95	-0,38
2,52	-474000,00	251,57	-474,00	-1,88	4,95	-0,38
2,52	-476000,00	252,32	-476,00	-1,89	4,95	-0,38
2,53	-480000,00	253,45	-480,00	-1,89	4,95	-0,38
2,54	-482000,00	253,87	-482,00	-1,90	4,95	-0,38
2,55	-486000,00	254,50	-486,00	-1,91	4,95	-0,39



**Figura 7.9: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 80%.**



**Figura 7.10: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 1 i càrrega del 80%**



**Figura 7.11: Representació gràfica del comportament de la Peça 1 per a les càrregues del 0%, 20%, 40%, 60% i 80%.**

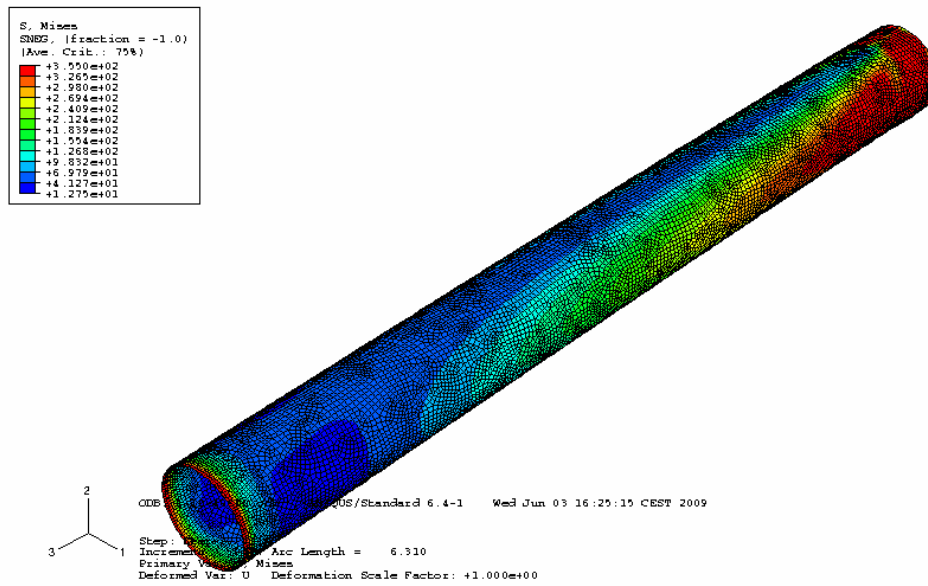
*Peça 2:*

Càrrega del 0 %:

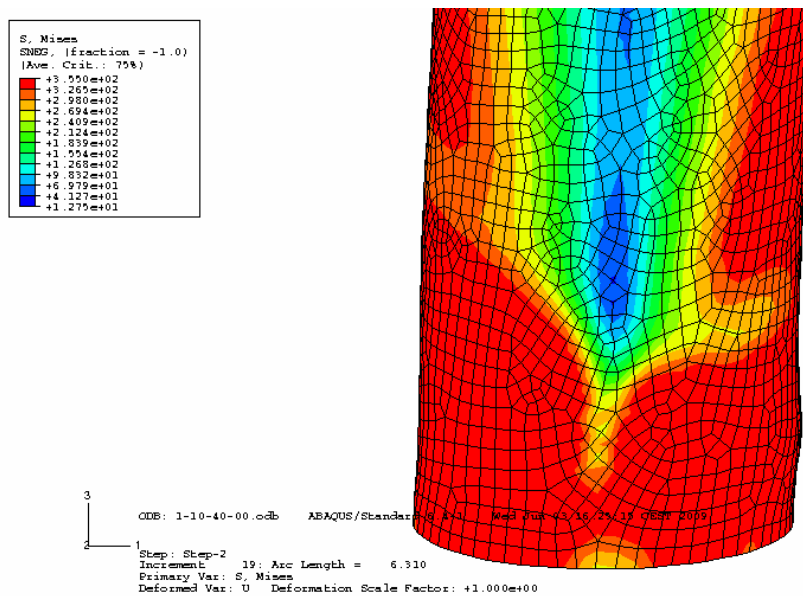
**Taula 7.6: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned =						
1-10-40-00						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	0,00	0,00	0,00	#jDIV/0!	9,91	#jDIV/0!
0,05	53223,60	5,00	53,22	10,64	9,91	1,07
0,10	106447,00	10,00	106,45	10,64	9,91	1,07
0,18	186283,00	17,50	186,28	10,64	9,91	1,07
0,29	306039,00	28,75	306,04	10,64	9,91	1,07
0,46	485380,00	45,63	485,38	10,64	9,91	1,07
0,71	751179,00	70,94	751,18	10,59	9,91	1,07
1,09	1136850,00	108,91	1136,85	10,44	9,91	1,05
1,47	1412870,00	146,88	1412,87	9,62	9,91	0,97
1,85	1498070,00	184,84	1498,07	8,10	9,91	0,82
2,23	1526030,00	222,81	1526,03	6,85	9,91	0,69
2,61	1537860,00	260,78	1537,86	5,90	9,91	0,59
2,99	1544040,00	298,75	1544,04	5,17	9,91	0,52
3,37	1547830,00	336,72	1547,83	4,60	9,91	0,46
3,75	1550180,00	374,69	1550,18	4,14	9,91	0,42
4,13	1551510,00	412,66	1551,51	3,76	9,91	0,38
4,51	1552030,00	450,63	1552,03	3,44	9,91	0,35
4,89	1551850,00	488,59	1551,85	3,18	9,91	0,32
5,46	1550320,00	545,55	1550,32	2,84	9,91	0,29
6,31	1545420,00	630,98	1545,42	2,45	9,91	0,25





**Figura 7.12: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 0%.**

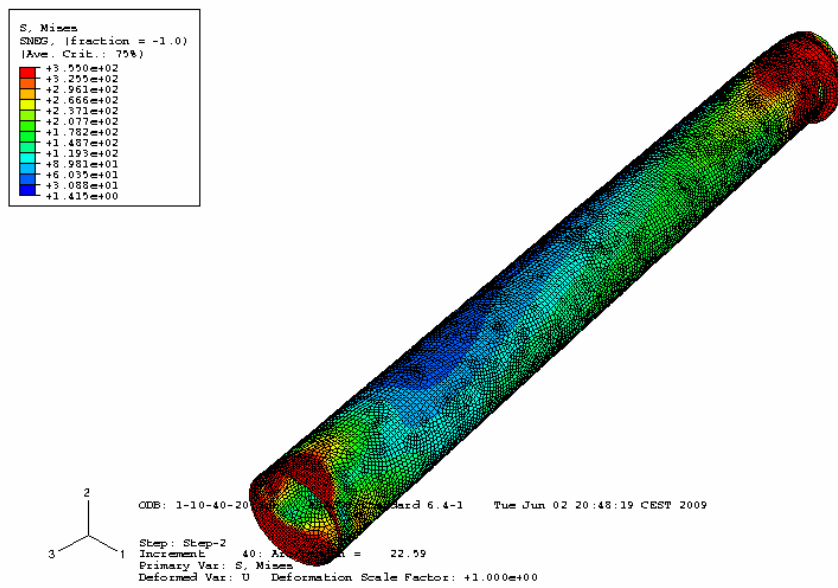


**Figura 7.13: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 0%.**

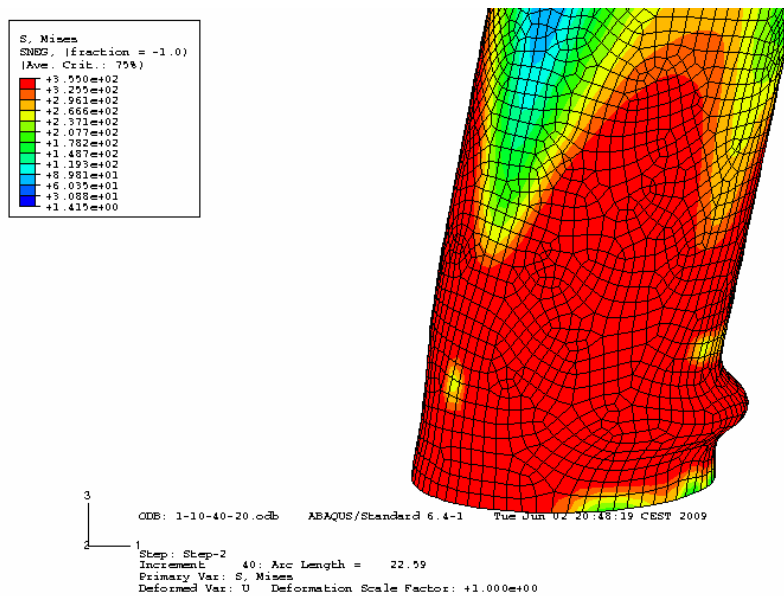
Càrrega del 20 %:

**Taula 7.7: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 8991 kN						
1-10-40-20						
x	b	d (mm)	V(kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	4,60	0,00	0,00	#DIV/0!	9,91	#DIV/0!
0,05	47976,90	5,00	47,98	9,60	9,91	0,97
0,10	95949,30	10,00	95,95	9,59	9,91	0,97
0,18	167908,00	17,50	167,91	9,59	9,91	0,97
0,29	275849,00	28,75	275,85	9,59	9,91	0,97
0,46	437205,00	45,63	437,21	9,58	9,91	0,97
0,71	674405,00	70,94	674,41	9,51	9,91	0,96
1,09	1005100,00	108,91	1005,10	9,23	9,91	0,93
1,47	1194760,00	146,88	1194,76	8,13	9,91	0,82
1,85	1252920,00	184,84	1252,92	6,78	9,91	0,68
2,23	1253920,00	222,81	1253,92	5,63	9,91	0,57
2,61	1236600,00	260,78	1236,60	4,74	9,91	0,48
2,99	1212210,00	298,75	1212,21	4,06	9,91	0,41
3,37	1183960,00	336,72	1183,96	3,52	9,91	0,35
3,75	1153220,00	374,69	1153,22	3,08	9,91	0,31
4,13	1120490,00	412,66	1120,49	2,72	9,91	0,27
4,51	1085990,00	450,63	1085,99	2,41	9,91	0,24
4,89	1050020,00	488,59	1050,02	2,15	9,91	0,22
5,27	1012700,00	526,56	1012,70	1,92	9,91	0,19
5,65	974135,00	564,53	974,14	1,73	9,91	0,17
6,21	913635,00	621,48	913,64	1,47	9,91	0,15
6,78	850415,00	678,44	850,42	1,25	9,91	0,13
7,35	785171,00	735,39	785,17	1,07	9,91	0,11
7,92	718675,00	792,34	718,68	0,91	9,91	0,09
8,49	651632,00	849,30	651,63	0,77	9,91	0,08
9,06	584576,00	906,25	584,58	0,65	9,91	0,07
9,63	517981,00	963,20	517,98	0,54	9,91	0,05
10,20	451907,00	1020,16	451,91	0,44	9,91	0,04
11,06	353859,00	1105,59	353,86	0,32	9,91	0,03
11,91	257011,00	1191,02	257,01	0,22	9,91	0,02
12,76	161806,00	1276,45	161,81	0,13	9,91	0,01
13,62	68224,80	1361,87	68,22	0,05	9,91	0,01
14,47	-23879,70	1447,30	-23,88	-0,02	9,91	0,00
15,33	-114688,00	1532,73	-114,69	-0,07	9,91	-0,01
16,18	-204277,00	1618,16	-204,28	-0,13	9,91	-0,01
17,04	-292732,00	1703,59	-292,73	-0,17	9,91	-0,02
17,89	-380201,00	1789,02	-380,20	-0,21	9,91	-0,02
18,74	-466693,00	1874,45	-466,69	-0,25	9,91	-0,03
20,03	-594844,00	2002,60	-594,84	-0,30	9,91	-0,03
21,31	-721508,00	2130,74	-721,51	-0,34	9,91	-0,03
22,59	-846652,00	2258,89	-846,65	-0,37	9,91	-0,04



**Figura 7.14: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 20%.**

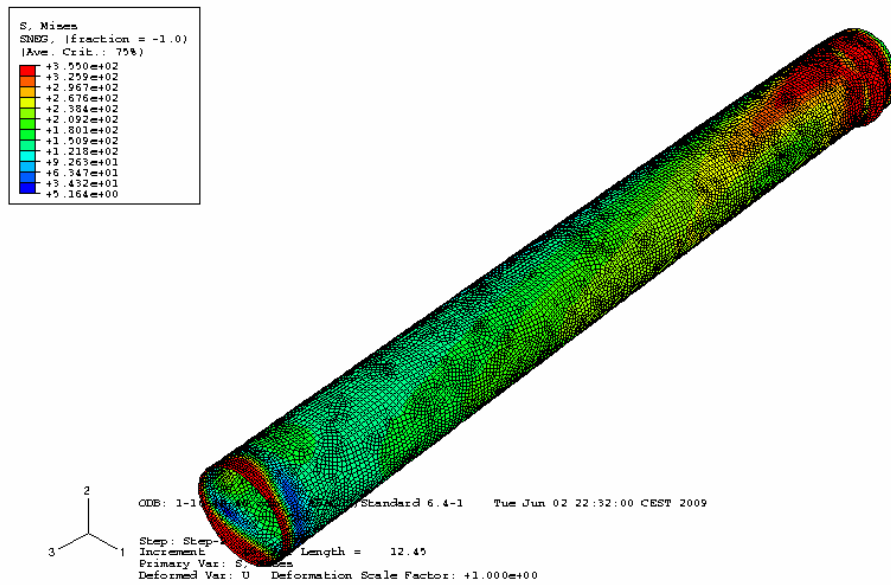


**Figura 7.15: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 20%.**

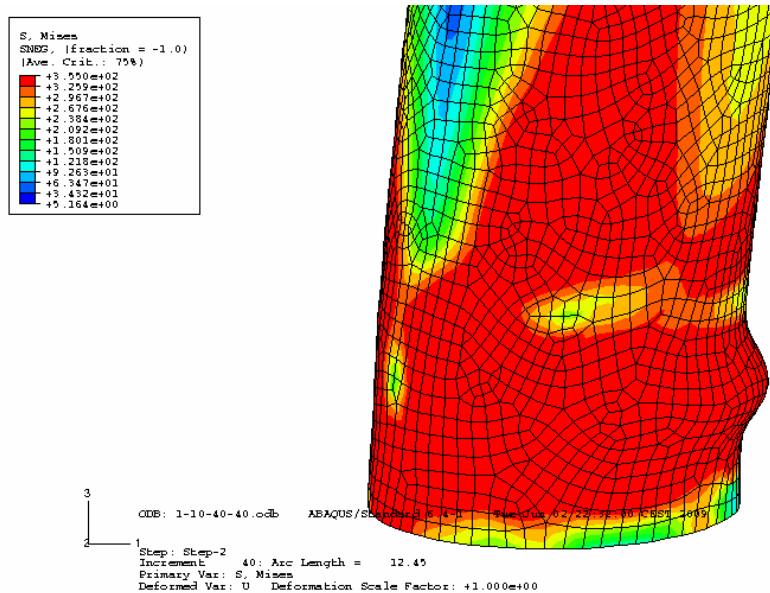
Càrrega del 40 %:

**Taula 7.8: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 17981 kN						
1-10-40-40						
x	b	d (mm)	V(kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	9,59	0,00	0,01	#DIV/0!	9,91	#DIV/0!
0,05	42710,80	5,00	42,71	8,54	9,91	0,86
0,10	85412,20	10,00	85,41	8,54	9,91	0,86
0,18	149465,00	17,50	149,47	8,54	9,91	0,86
0,29	245363,00	28,75	245,36	8,53	9,91	0,86
0,46	388025,00	45,63	388,03	8,50	9,91	0,86
0,71	595033,00	70,94	595,03	8,39	9,91	0,85
0,96	744862,00	96,25	744,86	7,74	9,91	0,78
1,22	816702,00	121,56	816,70	6,72	9,91	0,68
1,47	848800,00	146,88	848,80	5,78	9,91	0,58
1,72	858836,00	172,19	858,84	4,99	9,91	0,50
1,98	852932,00	197,50	852,93	4,32	9,91	0,44
2,23	833241,00	222,81	833,24	3,74	9,91	0,38
2,48	805494,00	248,13	805,49	3,25	9,91	0,33
2,73	772717,00	273,44	772,72	2,83	9,91	0,29
2,99	736298,00	298,75	736,30	2,46	9,91	0,25
3,24	697295,00	324,06	697,30	2,15	9,91	0,22
3,49	656242,00	349,38	656,24	1,88	9,91	0,19
3,75	613285,00	374,69	613,29	1,64	9,91	0,17
4,00	568579,00	400,00	568,58	1,42	9,91	0,14
4,25	522253,00	425,31	522,25	1,23	9,91	0,12
4,51	474563,00	450,63	474,56	1,05	9,91	0,11
4,76	425661,00	475,94	425,66	0,89	9,91	0,09
5,01	375632,00	501,25	375,63	0,75	9,91	0,08
5,27	324484,00	526,56	324,48	0,62	9,91	0,06
5,52	272152,00	551,88	272,15	0,49	9,91	0,05
5,77	218606,00	577,19	218,61	0,38	9,91	0,04
6,03	163918,00	602,50	163,92	0,27	9,91	0,03
6,28	108227,00	627,81	108,23	0,17	9,91	0,02
6,53	51784,00	653,13	51,78	0,08	9,91	0,01
6,78	-5140,56	678,44	-5,14	-0,01	9,91	0,00
7,04	-62371,10	703,75	-62,37	-0,09	9,91	-0,01
7,42	-148452,00	741,72	-148,45	-0,20	9,91	-0,02
7,80	-234534,00	779,69	-234,53	-0,30	9,91	-0,03
8,18	-320441,00	817,66	-320,44	-0,39	9,91	-0,04
8,75	-448348,00	874,61	-448,35	-0,51	9,91	-0,05
9,32	-574924,00	931,56	-574,92	-0,62	9,91	-0,06
9,89	-699839,00	988,52	-699,84	-0,71	9,91	-0,07
10,74	-884714,00	1073,95	-884,71	-0,82	9,91	-0,08
11,59	-1066580,00	1159,38	-1066,58	-0,92	9,91	-0,09
12,45	-1245370,00	1244,80	#####	-128,06	9,91	-12,92



**Figura 7.16: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 40%.**

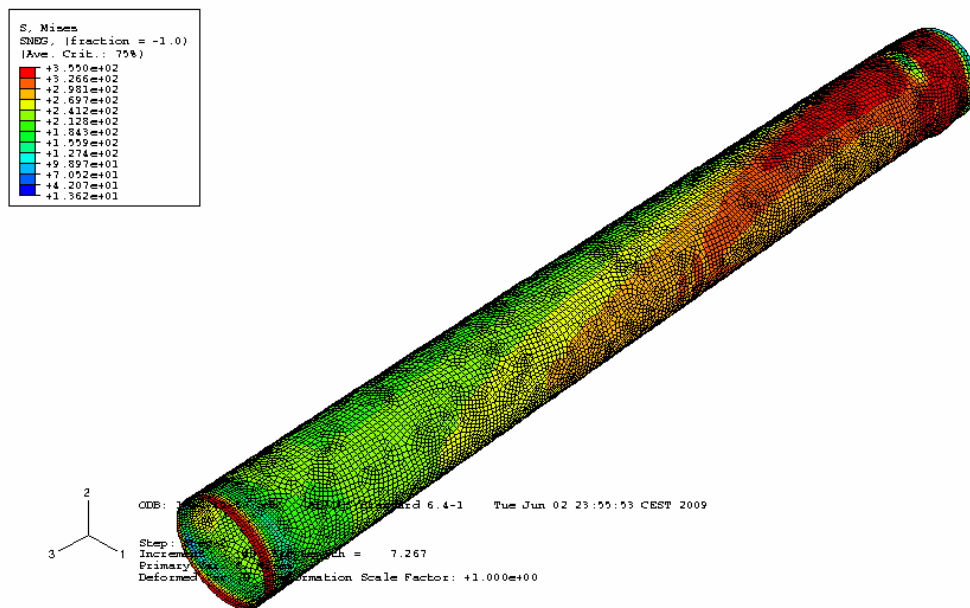


**Figura 7.17: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 40%.**

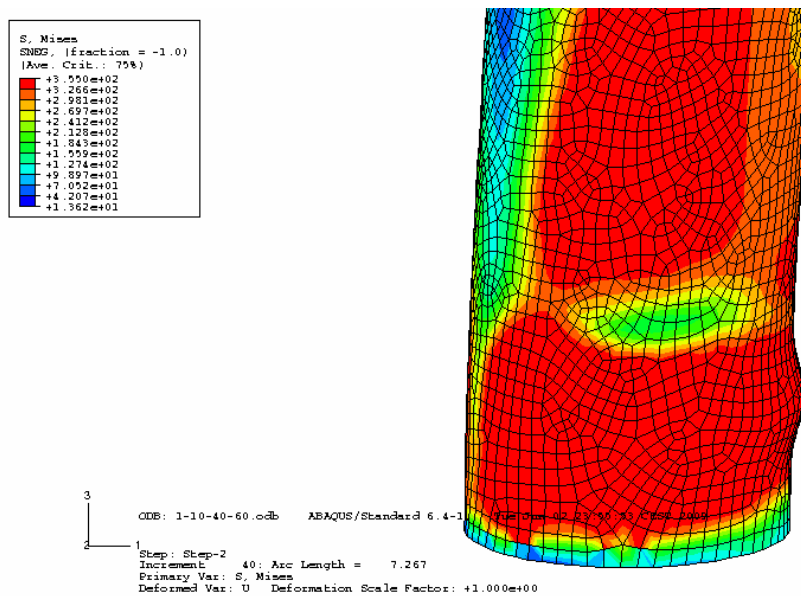
Càrrega del 60 %:

**Taula 7.9: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 26972,5 kN						
1-10-40-60						
x	b	d (mm)	V(kN)	Pendent	Pendent te	Pen/Pend teor
0,00	15,30	0,00	0,02	#DIV/0!	9,91	#DIV/0!
0,05	37425,00	5,00	37,43	7,49	9,91	0,76
0,10	74834,90	10,00	74,83	7,48	9,91	0,76
0,18	130760,00	17,50	130,76	7,47	9,91	0,75
0,29	214097,00	28,75	214,10	7,45	9,91	0,75
0,46	335975,00	45,63	335,98	7,36	9,91	0,74
0,71	450450,00	70,94	450,45	6,35	9,91	0,64
0,96	472512,00	96,25	472,51	4,91	9,91	0,50
1,22	458965,00	121,56	458,97	3,78	9,91	0,38
1,47	428948,00	146,88	428,95	2,92	9,91	0,29
1,72	389868,00	172,19	389,87	2,26	9,91	0,23
1,98	345187,00	197,50	345,19	1,75	9,91	0,18
2,35	271502,00	235,47	271,50	1,15	9,91	0,12
2,92	150488,00	292,42	150,49	0,51	9,91	0,05
3,07	118631,00	306,66	118,63	0,39	9,91	0,04
3,21	85801,10	320,90	85,80	0,27	9,91	0,03
3,35	51779,20	335,14	51,78	0,15	9,91	0,02
3,49	16725,40	349,38	16,73	0,05	9,91	0,00
3,64	-19341,20	363,61	-19,34	-0,05	9,91	-0,01
3,78	-56351,90	377,85	-56,35	-0,15	9,91	-0,02
3,92	-94253,60	392,09	-94,25	-0,24	9,91	-0,02
4,06	-133019,00	406,33	-133,02	-0,33	9,91	-0,03
4,21	-172600,00	420,57	-172,60	-0,41	9,91	-0,04
4,35	-212873,00	434,81	-212,87	-0,49	9,91	-0,05
4,49	-253816,00	449,04	-253,82	-0,57	9,91	-0,06
4,63	-295415,00	463,28	-295,42	-0,64	9,91	-0,06
4,78	-337588,00	477,52	-337,59	-0,71	9,91	-0,07
4,92	-380304,00	491,76	-380,30	-0,77	9,91	-0,08
5,06	-423555,00	506,00	-423,56	-0,84	9,91	-0,08
5,20	-467418,00	520,23	-467,42	-0,90	9,91	-0,09
5,34	-511863,00	534,47	-511,86	-0,96	9,91	-0,10
5,49	-556916,00	548,71	-556,92	-1,01	9,91	-0,10
5,63	-602539,00	562,95	-602,54	-1,07	9,91	-0,11
5,77	-648714,00	577,19	-648,71	-1,12	9,91	-0,11
5,99	-719006,00	598,55	-719,01	-1,20	9,91	-0,12
6,20	-790231,00	619,90	-790,23	-1,27	9,91	-0,13
6,41	-861988,00	641,26	-861,99	-1,34	9,91	-0,14
6,63	-934055,00	662,62	-934,06	-1,41	9,91	-0,14
6,84	-1006290,00	683,98	-1006,29	-1,47	9,91	-0,15
7,05	-1078520,00	705,33	-1078,52	-1,53	9,91	-0,15
7,27	-1150650,00	726,69	-1150,65	-1,58	9,91	-0,16



**Figura 7.18: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 60%.**



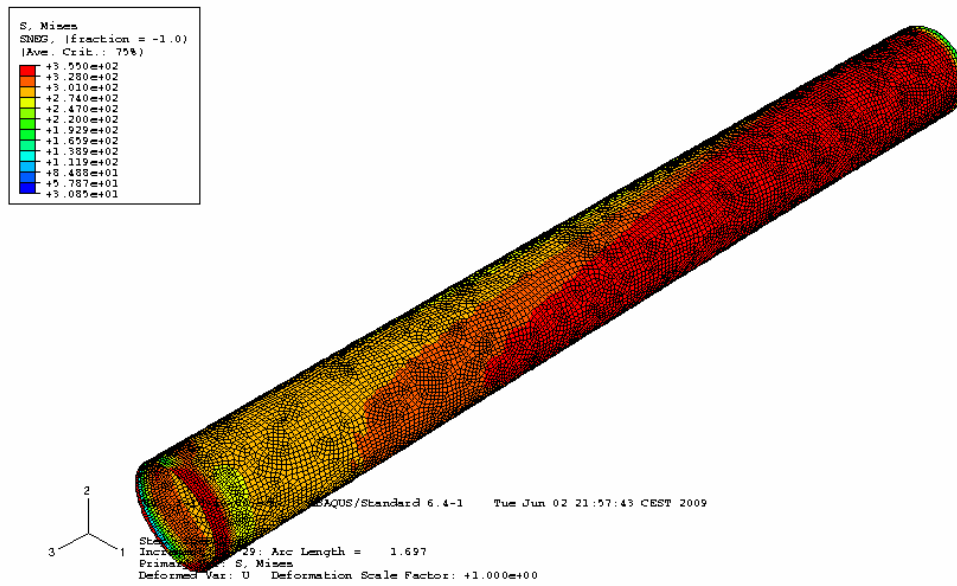
**Figura 7.19: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 60%.**

Càrrega del 80 %:

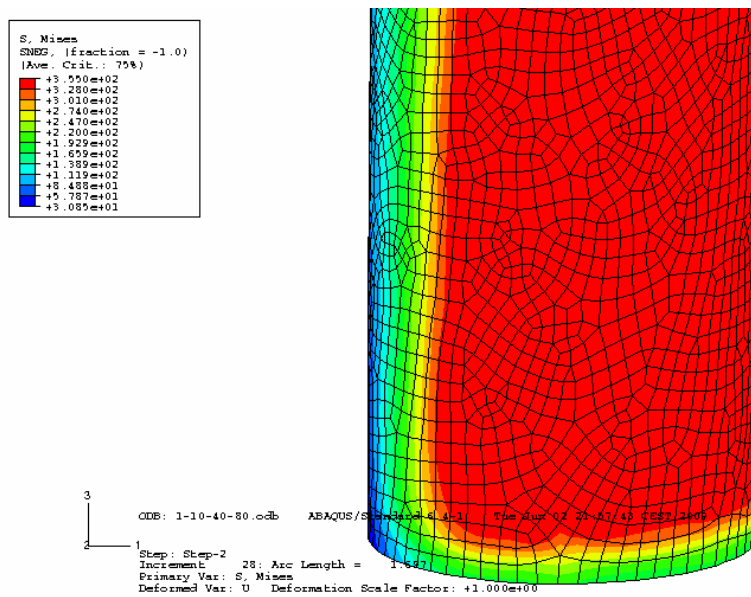
**Taula 7.10: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned =35963 kN						
1-10-40-80						
x	b	d (mm)	V(kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	21,69	0,00	0,02	#iDIV/0!	9,91	#iDIV/0!
0,05	31933,40	5,00	31,93	6,39	9,91	0,64
0,10	63663,40	10,00	63,66	6,37	9,91	0,64
0,18	110387,00	17,50	110,39	6,31	9,91	0,64
0,29	172171,00	28,75	172,17	5,99	9,91	0,60
0,40	190929,00	40,00	190,93	4,77	9,91	0,48
0,51	184479,00	51,25	184,48	3,60	9,91	0,36
0,63	166965,00	62,50	166,97	2,67	9,91	0,27
0,74	143463,00	73,75	143,46	1,95	9,91	0,20
0,85	116385,00	85,00	116,39	1,37	9,91	0,14
0,96	86961,50	96,25	86,96	0,90	9,91	0,09
1,08	55861,40	107,50	55,86	0,52	9,91	0,05
1,19	23520,20	118,75	23,52	0,20	9,91	0,02
1,30	-9905,70	130,00	-9,91	-0,08	9,91	-0,01
1,41	-44227,20	141,25	-44,23	-0,31	9,91	-0,03
1,53	-79331,50	152,50	-79,33	-0,52	9,91	-0,05
1,64	-115180,00	163,75	-115,18	-0,70	9,91	-0,07
1,67	-124263,00	166,56	-124,26	-0,75	9,91	-0,08
1,69	-133390,00	169,38	-133,39	-0,79	9,91	-0,08
1,69	-133386,00	169,42	-133,39	-0,79	9,91	-0,08
1,69	-133381,00	169,46	-133,38	-0,79	9,91	-0,08
1,70	-133377,00	169,51	-133,38	-0,79	9,91	-0,08
1,70	-133370,00	169,57	-133,37	-0,79	9,91	-0,08
1,70	-133364,00	169,64	-133,36	-0,79	9,91	-0,08
1,70	-133358,00	169,71	-133,36	-0,79	9,91	-0,08
1,70	-133356,00	169,72	-133,36	-0,79	9,91	-0,08
1,70	-133355,00	169,74	-133,36	-0,79	9,91	-0,08
1,70	-133354,00	169,75	-133,35	-0,79	9,91	-0,08
1,70	-133354,00	169,75	-133,35	-0,79	9,91	-0,08
1,70	-133354,00	169,75	-133,35	-0,79	9,91	-0,08

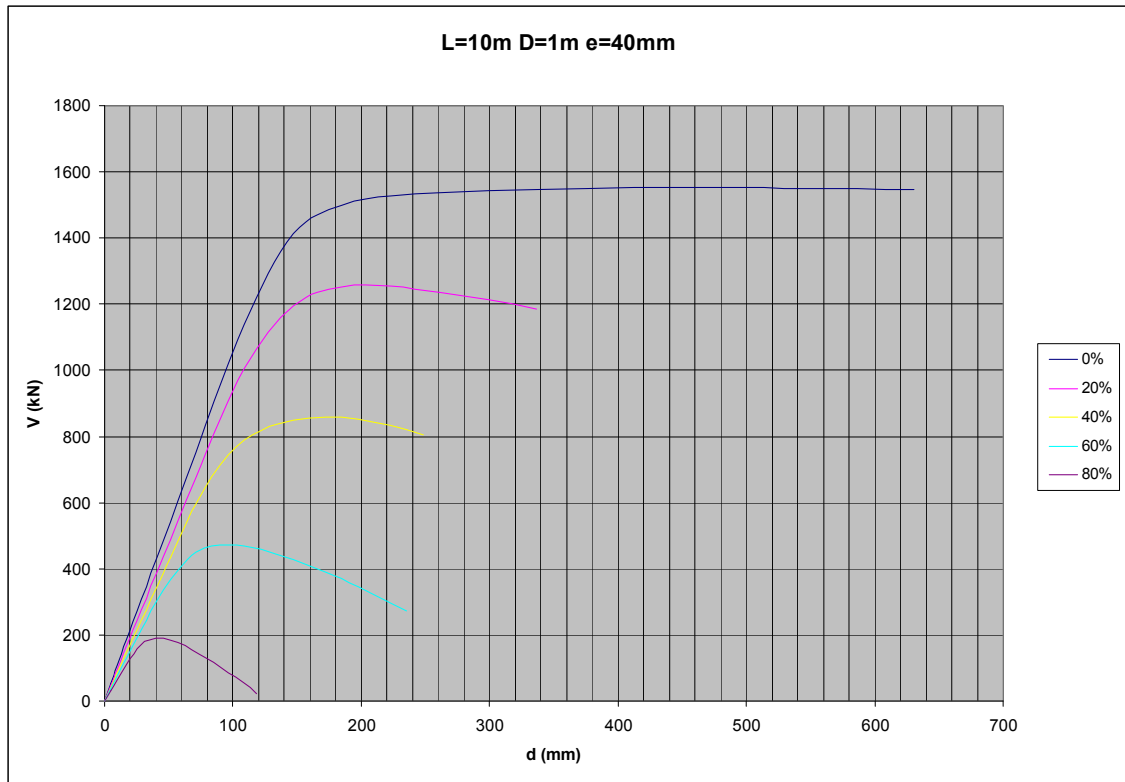




**Figura 7.20: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 80%.**



**Figura 7.21: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 2 i càrrega del 80%.**



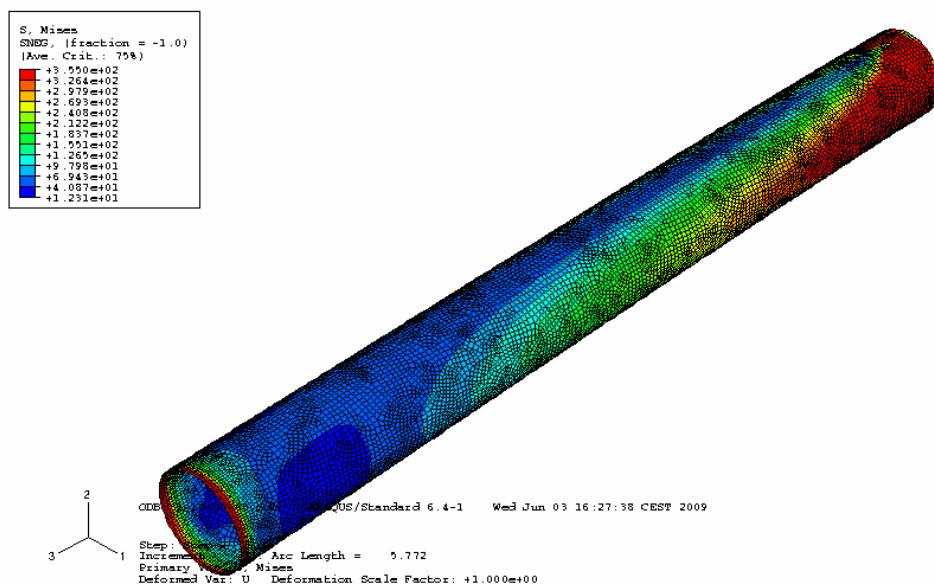
**Figura 7.22: Representació gràfica del comportament de la Peça 2 per a les càrregues del 0%, 20%, 40%, 60% i 80%.**

*Peça 3:*

Càrrega del 0 %:

**Taula 7.11: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned =						
1-10-60-00						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	14,90	#DIV/0!
0,05	83802,00	5,00	83,80	16,76	14,90	1,13
0,10	167604,00	10,00	167,60	16,76	14,90	1,13
0,18	293308,00	17,50	293,31	16,76	14,90	1,13
0,29	481869,00	28,75	481,87	16,76	14,90	1,13
0,46	762353,00	45,63	762,35	16,71	14,90	1,12
0,71	1168930,00	70,94	1168,93	16,48	14,90	1,11
0,96	1557860,00	96,25	1557,86	16,19	14,90	1,09
1,22	1930890,00	121,56	1930,89	15,88	14,90	1,07
1,47	2158270,00	146,88	2158,27	14,69	14,90	0,99
1,72	2258790,00	172,19	2258,79	13,12	14,90	0,88
1,98	2305540,00	197,50	2305,54	11,67	14,90	0,78
2,23	2329720,00	222,81	2329,72	10,46	14,90	0,70
2,48	2343990,00	248,13	2343,99	9,45	14,90	0,63
2,73	2353460,00	273,44	2353,46	8,61	14,90	0,58
2,99	2360450,00	298,75	2360,45	7,90	14,90	0,53
3,24	2365990,00	324,06	2365,99	7,30	14,90	0,49
3,49	2370680,00	349,38	2370,68	6,79	14,90	0,46
3,75	2374920,00	374,69	2374,92	6,34	14,90	0,43
4,00	2378680,00	400,00	2378,68	5,95	14,90	0,40
4,25	2382070,00	425,31	2382,07	5,60	14,90	0,38
4,51	2385250,00	450,63	2385,25	5,29	14,90	0,36
4,76	2388270,00	475,94	2388,27	5,02	14,90	0,34
5,01	2391150,00	501,25	2391,15	4,77	14,90	0,32
5,27	2393900,00	526,56	2393,90	4,55	14,90	0,31
5,52	2396550,00	551,88	2396,55	4,34	14,90	0,29
5,77	2399070,00	577,19	2399,07	4,16	14,90	0,28
6,03	2401500,00	602,50	2401,50	3,99	14,90	0,27
6,28	2403850,00	627,81	2403,85	3,83	14,90	0,26
6,53	2406160,00	653,13	2406,16	3,68	14,90	0,25
6,78	2408410,00	678,44	2408,41	3,55	14,90	0,24
7,04	2410620,00	703,75	2410,62	3,43	14,90	0,23
7,29	2412770,00	729,06	2412,77	3,31	14,90	0,22
7,54	2414850,00	754,38	2414,85	3,20	14,90	0,21
7,80	2416840,00	779,69	2416,84	3,10	14,90	0,21
8,05	2418760,00	805,00	2418,76	3,00	14,90	0,20
8,30	2420600,00	830,31	2420,60	2,92	14,90	0,20
8,56	2422390,00	855,63	2422,39	2,83	14,90	0,19
8,81	2424090,00	880,94	2424,09	2,75	14,90	0,18
9,06	2425680,00	906,25	2425,68	2,68	14,90	0,18
9,44	2427930,00	944,22	2427,93	2,57	14,90	0,17

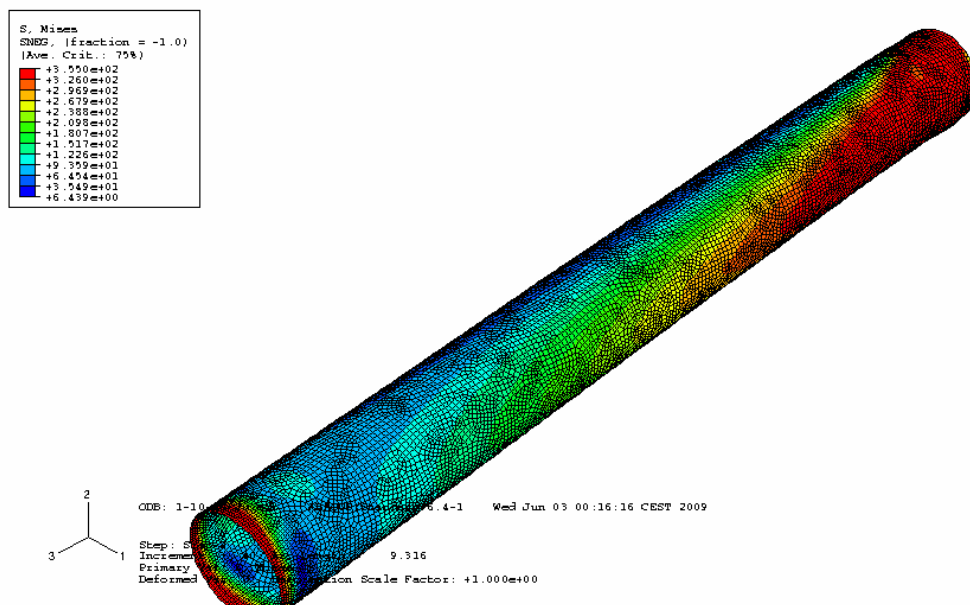


**Figura 7.23: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 3 i càrrega del 0%.**

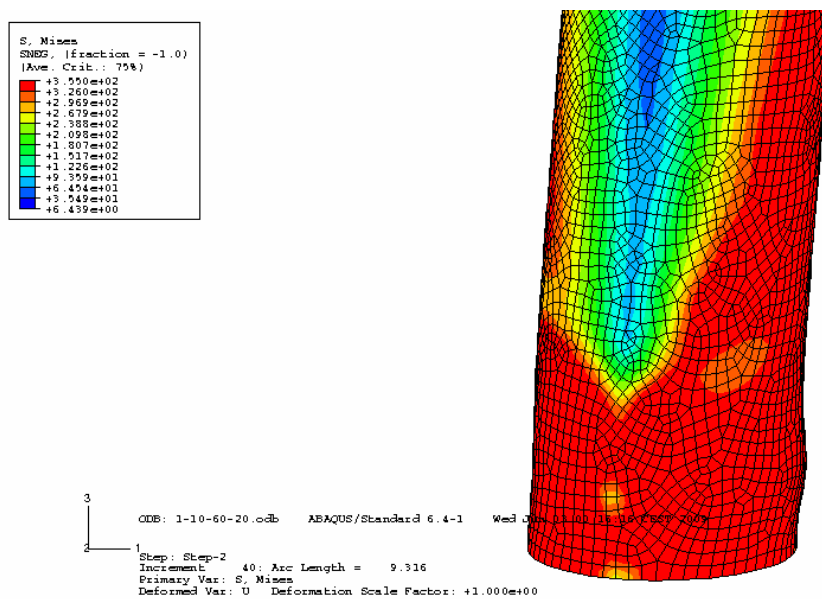
Càrrega del 20 %:

**Taula 7.12: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 13487 kN						
1-10-60-20						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	5,94	0,00	0,01	#DIV/0!	14,90	#DIV/0!
0,05	75965,00	5,00	75,97	15,19	14,90	1,02
0,10	151924,00	10,00	151,92	15,19	14,90	1,02
0,18	265865,00	17,50	265,87	15,19	14,90	1,02
0,29	436689,00	28,75	436,69	15,19	14,90	1,02
0,46	690163,00	45,63	690,16	15,13	14,90	1,02
0,71	1052760,00	70,94	1052,76	14,84	14,90	1,00
0,96	1401180,00	96,25	1401,18	14,56	14,90	0,98
1,22	1667580,00	121,56	1667,58	13,72	14,90	0,92
1,47	1830090,00	146,88	1830,09	12,46	14,90	0,84
1,72	1902070,00	172,19	1902,07	11,05	14,90	0,74
1,98	1923110,00	197,50	1923,11	9,74	14,90	0,65
2,23	1920830,00	222,81	1920,83	8,62	14,90	0,58
2,48	1907350,00	248,13	1907,35	7,69	14,90	0,52
2,73	1888310,00	273,44	1888,31	6,91	14,90	0,46
2,99	1866330,00	298,75	1866,33	6,25	14,90	0,42
3,24	1842410,00	324,06	1842,41	5,69	14,90	0,38
3,49	1817580,00	349,38	1817,58	5,20	14,90	0,35
3,75	1792040,00	374,69	1792,04	4,78	14,90	0,32
4,00	1766000,00	400,00	1766,00	4,42	14,90	0,30
4,25	1739490,00	425,31	1739,49	4,09	14,90	0,27
4,51	1712600,00	450,63	1712,60	3,80	14,90	0,26
4,76	1685350,00	475,94	1685,35	3,54	14,90	0,24
5,01	1657820,00	501,25	1657,82	3,31	14,90	0,22
5,27	1630010,00	526,56	1630,01	3,10	14,90	0,21
5,52	1601930,00	551,88	1601,93	2,90	14,90	0,19
5,77	1573600,00	577,19	1573,60	2,73	14,90	0,18
6,03	1545040,00	602,50	1545,04	2,56	14,90	0,17
6,28	1516250,00	627,81	1516,25	2,42	14,90	0,16
6,53	1487230,00	653,13	1487,23	2,28	14,90	0,15
6,78	1457990,00	678,44	1457,99	2,15	14,90	0,14
7,04	1428530,00	703,75	1428,53	2,03	14,90	0,14
7,29	1398860,00	729,06	1398,86	1,92	14,90	0,13
7,54	1368970,00	754,38	1368,97	1,81	14,90	0,12
7,80	1338870,00	779,69	1338,87	1,72	14,90	0,12
8,05	1308540,00	805,00	1308,54	1,63	14,90	0,11
8,30	1277980,00	830,31	1277,98	1,54	14,90	0,10
8,56	1247190,00	855,63	1247,19	1,46	14,90	0,10
8,81	1216180,00	880,94	1216,18	1,38	14,90	0,09
9,06	1184940,00	906,25	1184,94	1,31	14,90	0,09
9,32	1153470,00	931,56	1153,47	1,24	14,90	0,08



**Figura 7.24: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 3 i càrrega del 20%.**

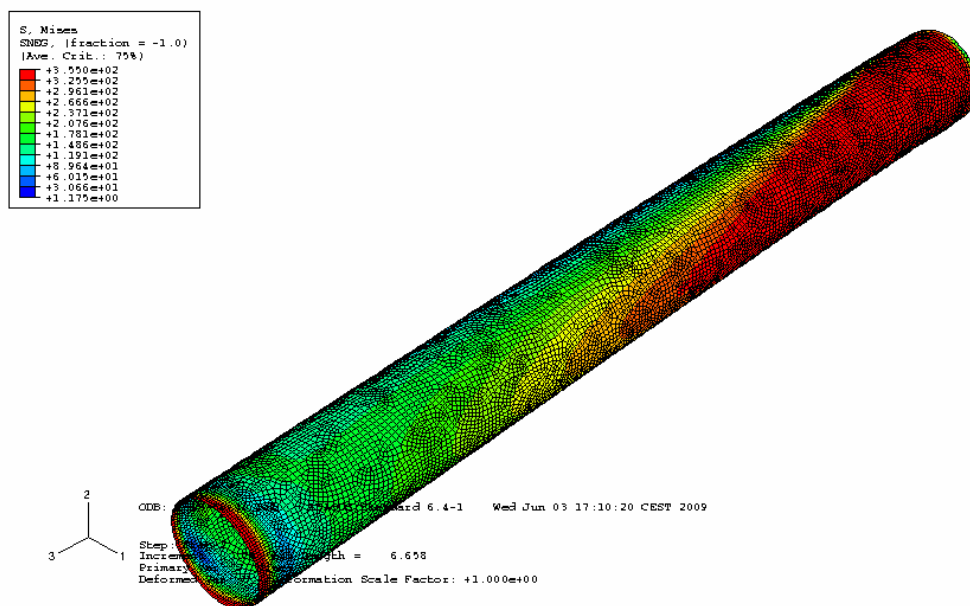


**Figura 7.25: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 3 i càrrega del 20%.**

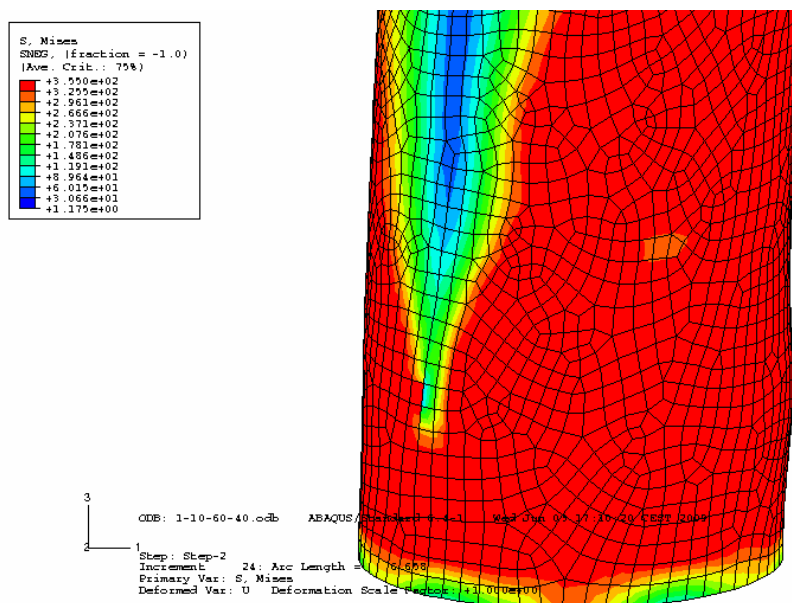
Càrrega del 40 %:

**Taula 7.13: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 26975 kN						
1-10-60-40						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	12,67	0,00	0,01	#DIV/0!	14,90	#DIV/0!
0,05	68100,60	5,00	68,10	13,62	14,90	0,91
0,10	136189,00	10,00	136,19	13,62	14,90	0,91
0,18	238314,00	17,50	238,31	13,62	14,90	0,91
0,29	390740,00	28,75	390,74	13,59	14,90	0,91
0,46	613448,00	45,63	613,45	13,45	14,90	0,90
0,71	927934,00	70,94	927,93	13,08	14,90	0,88
0,96	1150210,00	96,25	1150,21	11,95	14,90	0,80
1,22	1256860,00	121,56	1256,86	10,34	14,90	0,69
1,47	1304630,00	146,88	1304,63	8,88	14,90	0,60
1,72	1319470,00	172,19	1319,47	7,66	14,90	0,51
1,98	1311450,00	197,50	1311,45	6,64	14,90	0,45
2,23	1283740,00	222,81	1283,74	5,76	14,90	0,39
2,48	1244830,00	248,13	1244,83	5,02	14,90	0,34
2,86	1174760,00	286,09	1174,76	4,11	14,90	0,28
3,24	1097280,00	324,06	1097,28	3,39	14,90	0,23
3,62	1016300,00	362,03	1016,30	2,81	14,90	0,19
4,00	932886,00	400,00	932,89	2,33	14,90	0,16
4,38	847784,00	437,97	847,78	1,94	14,90	0,13
4,76	761315,00	475,94	761,32	1,60	14,90	0,11
5,14	673558,00	513,91	673,56	1,31	14,90	0,09
5,52	584562,00	551,88	584,56	1,06	14,90	0,07
5,90	494376,00	589,84	494,38	0,84	14,90	0,06
6,28	403001,00	627,81	403,00	0,64	14,90	0,04
6,66	310479,00	665,78	310,48	0,47	14,90	0,03



**Figura 7.26: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 3 i càrrega del 40%.**



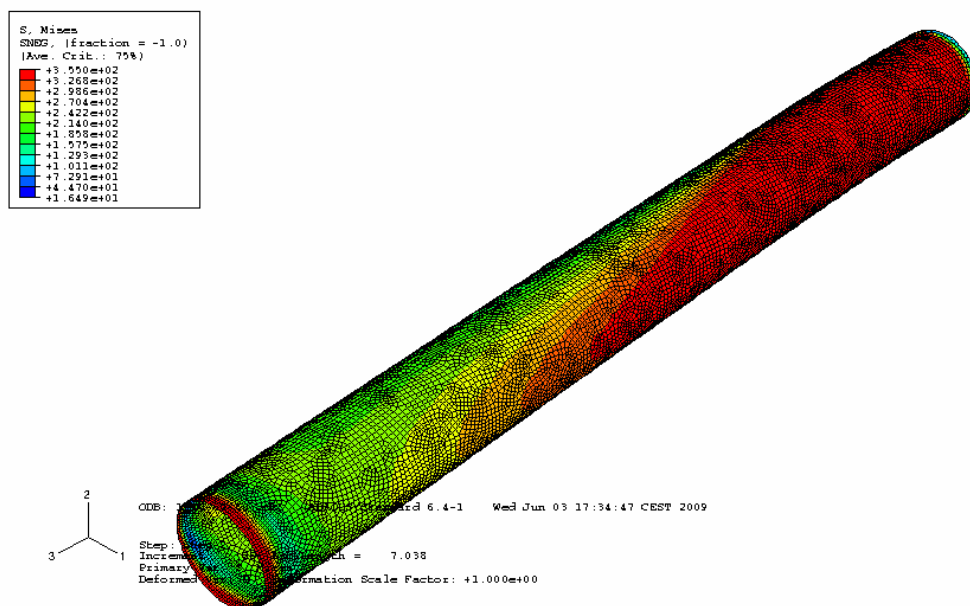
**Figura 7.27: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 3 i càrrega del 40%.**



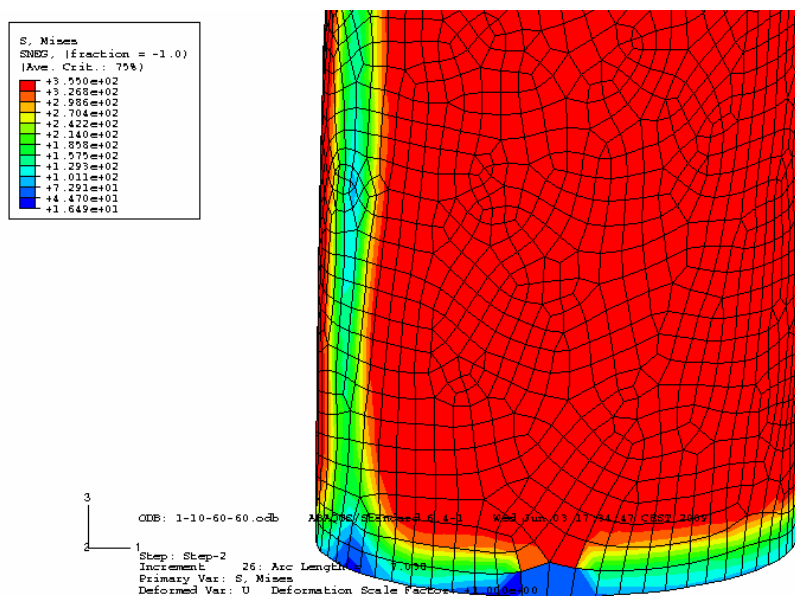
Càrrega del 60 %:

**Taula 7.14: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 40462						
1-10-60-60						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	20,32	0,00	0,02	#DIV/0!	14,90	#DIV/0!
0,05	60207,40	5,00	60,21	12,04	14,90	0,81
0,10	120338,00	10,00	120,34	12,03	14,90	0,81
0,18	210070,00	17,50	210,07	12,00	14,90	0,81
0,29	341853,00	28,75	341,85	11,89	14,90	0,80
0,46	530178,00	45,63	530,18	11,62	14,90	0,78
0,63	666233,00	62,50	666,23	10,66	14,90	0,72
0,79	720366,00	79,38	720,37	9,08	14,90	0,61
0,96	732589,00	96,25	732,59	7,61	14,90	0,51
1,13	722411,00	113,13	722,41	6,39	14,90	0,43
1,30	699046,00	130,00	699,05	5,38	14,90	0,36
1,47	667131,00	146,88	667,13	4,54	14,90	0,30
1,72	608865,00	172,19	608,87	3,54	14,90	0,24
2,10	506980,00	210,16	506,98	2,41	14,90	0,16
2,48	394274,00	248,13	394,27	1,59	14,90	0,11
2,86	274128,00	286,09	274,13	0,96	14,90	0,06
3,24	148524,00	324,06	148,52	0,46	14,90	0,03
3,62	19058,20	362,03	19,06	0,05	14,90	0,00
4,00	-113530,00	400,00	-113,53	-0,28	14,90	-0,02
4,38	-248575,00	437,97	-248,58	-0,57	14,90	-0,04
4,76	-385861,00	475,94	-385,86	-0,81	14,90	-0,05
5,14	-525408,00	513,91	-525,41	-1,02	14,90	-0,07
5,52	-667414,00	551,88	-667,41	-1,21	14,90	-0,08
5,90	-812489,00	589,84	-812,49	-1,38	14,90	-0,09
6,28	-960334,00	627,81	-960,33	-1,53	14,90	-0,10
6,66	-1110650,00	665,78	-1110,65	-1,67	14,90	-0,11
7,04	-1263370,00	703,75	-1263,37	-1,80	14,90	-0,12



**Figura 7.28: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 3 i càrrega del 60%.**

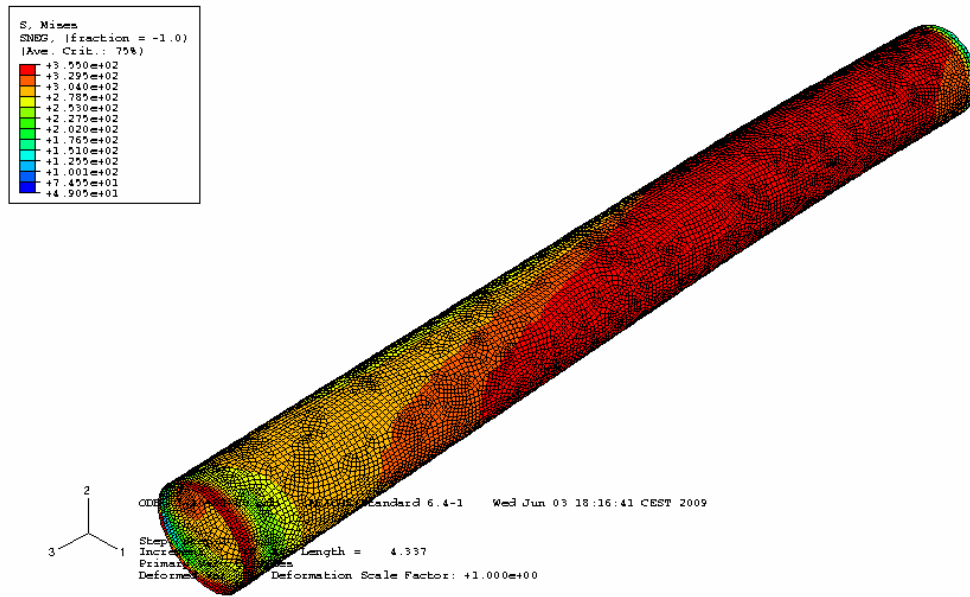


**Figura 7.29: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 3 i càrrega del 60%.**

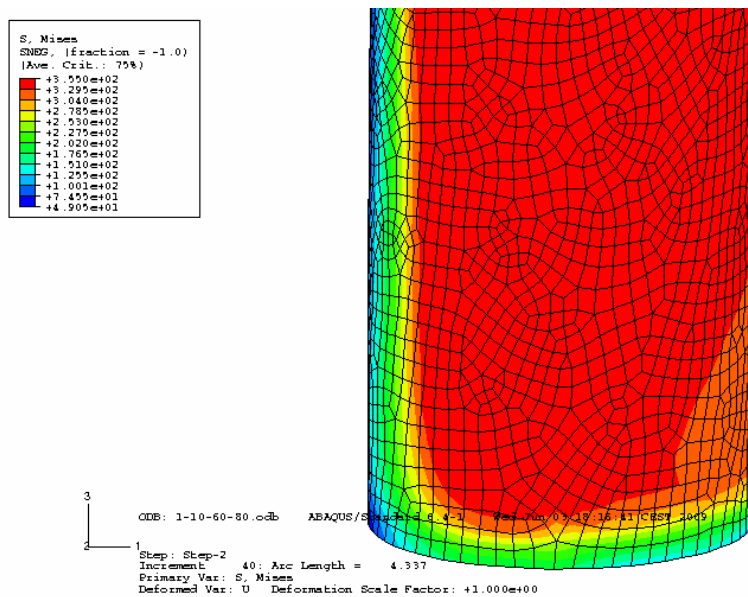
Càrrega del 80 %:

**Taula 7.15: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

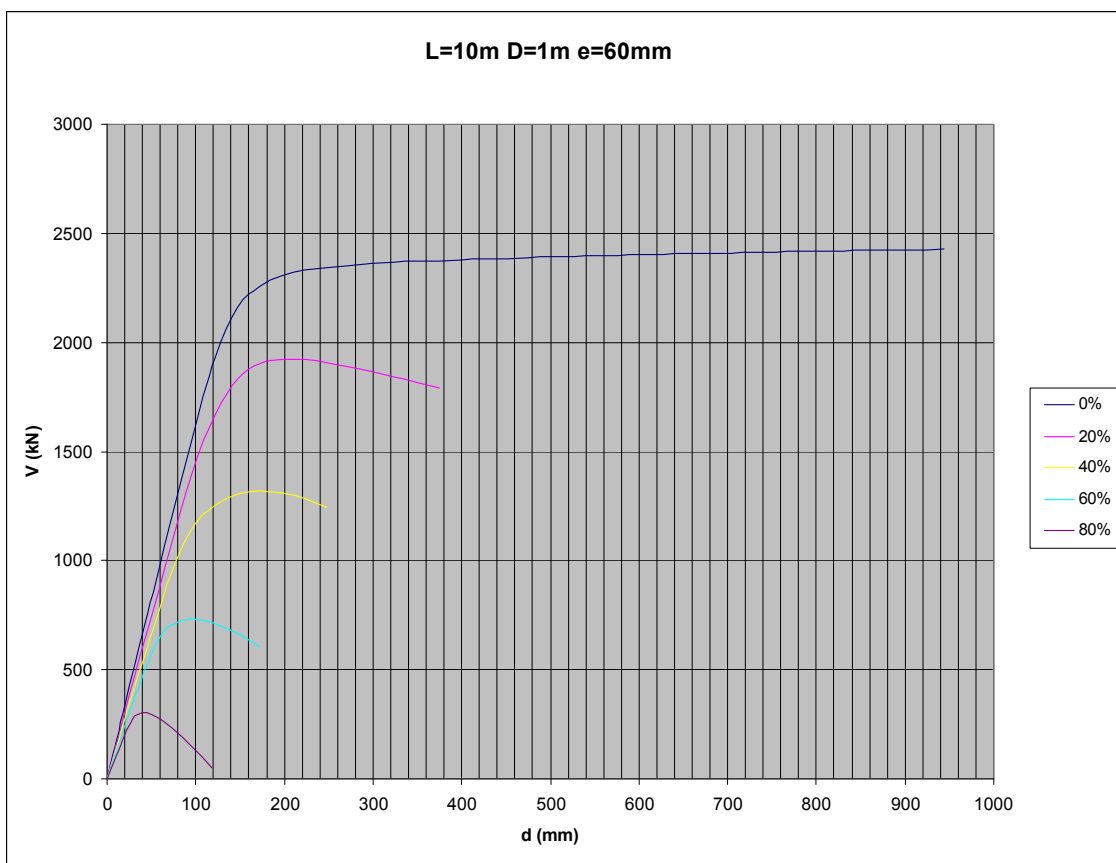
Ned = 53950 kN						
1-10-60-80						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	28,77	0,00	0,03	#DIV/0!	14,90	#DIV/0!
0,05	51873,00	5,00	51,87	10,37	14,90	0,70
0,10	102781,00	10,00	102,78	10,28	14,90	0,69
0,18	177492,00	17,50	177,49	10,14	14,90	0,68
0,29	273635,00	28,75	273,64	9,52	14,90	0,64
0,40	301959,00	40,00	301,96	7,55	14,90	0,51
0,51	292645,00	51,25	292,65	5,71	14,90	0,38
0,63	266436,00	62,50	266,44	4,26	14,90	0,29
0,74	231376,00	73,75	231,38	3,14	14,90	0,21
0,85	190986,00	85,00	190,99	2,25	14,90	0,15
0,96	146883,00	96,25	146,88	1,53	14,90	0,10
1,08	100090,00	107,50	100,09	0,93	14,90	0,06
1,19	51351,20	118,75	51,35	0,43	14,90	0,03
1,30	1096,41	130,00	1,10	0,01	14,90	0,00
1,41	-50449,40	141,25	-50,45	-0,36	14,90	-0,02
1,53	-103110,00	152,50	-103,11	-0,68	14,90	-0,05
1,64	-156831,00	163,75	-156,83	-0,96	14,90	-0,06
1,75	-211573,00	175,00	-211,57	-1,21	14,90	-0,08
1,86	-267398,00	186,25	-267,40	-1,44	14,90	-0,10
1,98	-324372,00	197,50	-324,37	-1,64	14,90	-0,11
2,09	-382475,00	208,75	-382,48	-1,83	14,90	-0,12
2,20	-441727,00	220,00	-441,73	-2,01	14,90	-0,13
2,31	-502079,00	231,25	-502,08	-2,17	14,90	-0,15
2,43	-563564,00	242,50	-563,56	-2,32	14,90	-0,16
2,54	-626170,00	253,75	-626,17	-2,47	14,90	-0,17
2,65	-689922,00	265,00	-689,92	-2,60	14,90	-0,17
2,76	-754790,00	276,25	-754,79	-2,73	14,90	-0,18
2,88	-820782,00	287,50	-820,78	-2,85	14,90	-0,19
2,99	-887930,00	298,75	-887,93	-2,97	14,90	-0,20
3,10	-956239,00	310,00	-956,24	-3,08	14,90	-0,21
3,21	-1025710,00	321,25	-1025,71	-3,19	14,90	-0,21
3,33	-1096410,00	332,50	-1096,41	-3,30	14,90	-0,22
3,44	-1168330,00	343,75	-1168,33	-3,40	14,90	-0,23
3,55	-1241430,00	355,00	-1241,43	-3,50	14,90	-0,23
3,66	-1315760,00	366,25	-1315,76	-3,59	14,90	-0,24
3,78	-1391350,00	377,50	-1391,35	-3,69	14,90	-0,25
3,89	-1468190,00	388,75	-1468,19	-3,78	14,90	-0,25
4,00	-1546380,00	400,00	-1546,38	-3,87	14,90	-0,26
4,11	-1625840,00	411,25	-1625,84	-3,95	14,90	-0,27
4,23	-1706600,00	422,50	-1706,60	-4,04	14,90	-0,27
4,34	-1788740,00	433,75	-1788,74	-4,12	14,90	-0,28



**Figura 7.30: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 3 i càrrega del 80%.**



**Figura 7.31: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 3 i càrrega del 80%.**



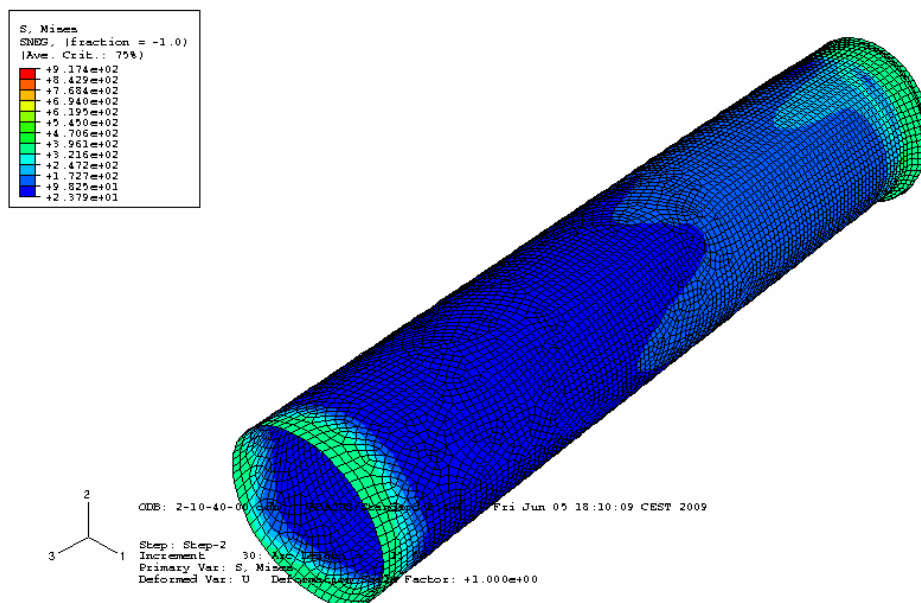
**Figura 7.32: Representació gràfica del comportament de la Peça 3 per a les càrregues del 0%, 20%, 40%, 60% i 80%.**

*Peça 4:*

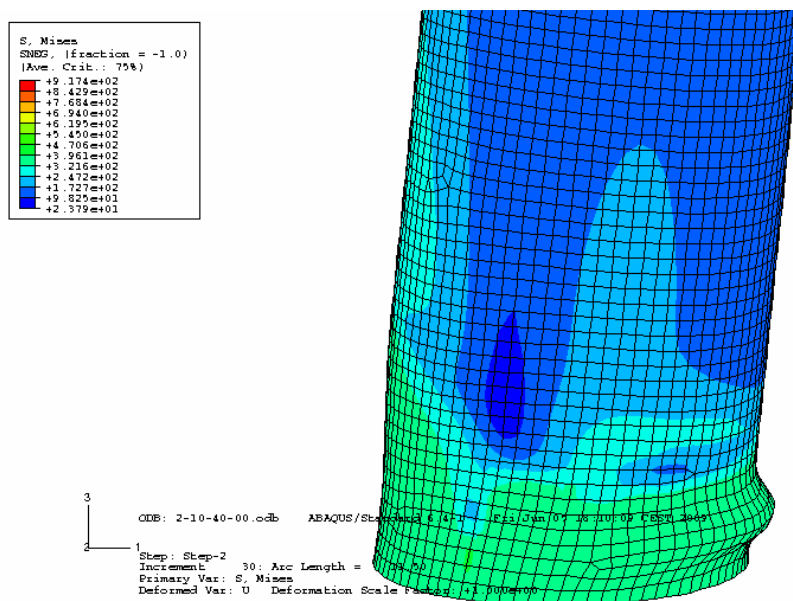
Càrrega del 0 %:

**Taula 7.16: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned =						
2-10-40-00						
v	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	79,20	#DIV/0!
0,05	378524,00	5,00	378,52	75,70	79,20	0,96
0,10	757044,00	10,00	757,04	75,70	79,20	0,96
0,18	1324810,00	17,50	1324,81	75,70	79,20	0,96
0,29	2176420,00	28,75	2176,42	75,70	79,20	0,96
0,46	3453700,00	45,63	3453,70	75,70	79,20	0,96
0,71	5211040,00	70,94	5211,04	73,46	79,20	0,93
0,96	5811380,00	96,25	5811,38	60,38	79,20	0,76
1,22	5960100,00	121,56	5960,10	49,03	79,20	0,62
1,47	5984300,00	146,88	5984,30	40,74	79,20	0,51
1,72	5967300,00	172,19	5967,30	34,66	79,20	0,44
1,98	5931320,00	197,50	5931,32	30,03	79,20	0,38
2,23	5882670,00	222,81	5882,67	26,40	79,20	0,33
2,48	5822540,00	248,13	5822,54	23,47	79,20	0,30
2,73	5754740,00	273,44	5754,74	21,05	79,20	0,27
2,99	5683520,00	298,75	5683,52	19,02	79,20	0,24
3,24	5611390,00	324,06	5611,39	17,32	79,20	0,22
3,49	5540340,00	349,38	5540,34	15,86	79,20	0,20
3,75	5471410,00	374,69	5471,41	14,60	79,20	0,18
4,00	5404950,00	400,00	5404,95	13,51	79,20	0,17
4,38	5309210,00	437,97	5309,21	12,12	79,20	0,15
4,95	5176040,00	494,92	5176,04	10,46	79,20	0,13
5,52	5056620,00	551,88	5056,62	9,16	79,20	0,12
6,09	4948330,00	608,83	4948,33	8,13	79,20	0,10
6,66	4850590,00	665,78	4850,59	7,29	79,20	0,09
7,23	4762380,00	722,73	4762,38	6,59	79,20	0,08
8,08	4644490,00	808,16	4644,49	5,75	79,20	0,07
8,94	4542560,00	893,59	4542,56	5,08	79,20	0,06
9,79	4452930,00	979,02	4452,93	4,55	79,20	0,06
10,64	4373740,00	1064,45	4373,74	4,11	79,20	0,05
11,50	4302870,00	1149,88	4302,87	3,74	79,20	0,05



**Figura 7.33: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 4 i càrrega del 0%.**



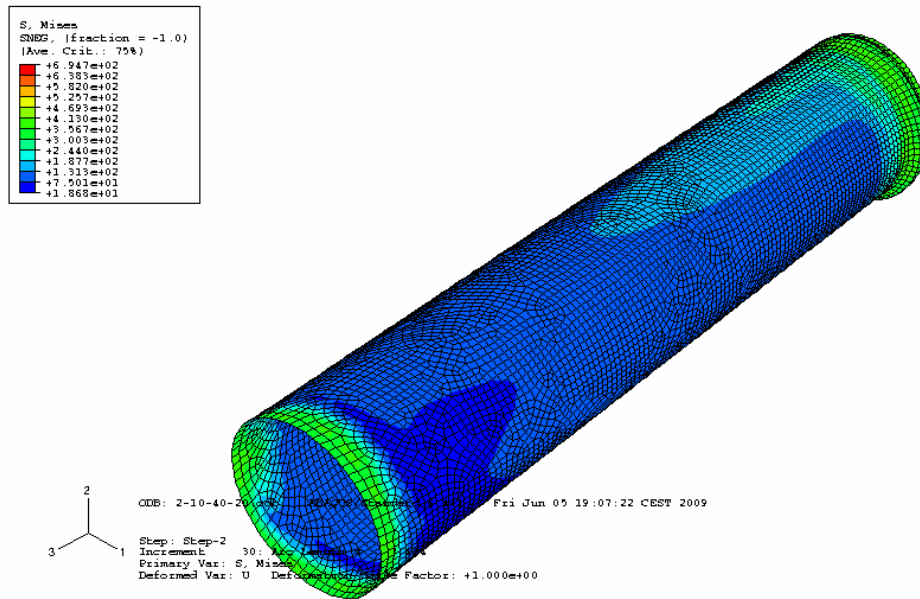
**Figura 7.34: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 4 i càrrega del 0%.**

Càrrega del 20 %:

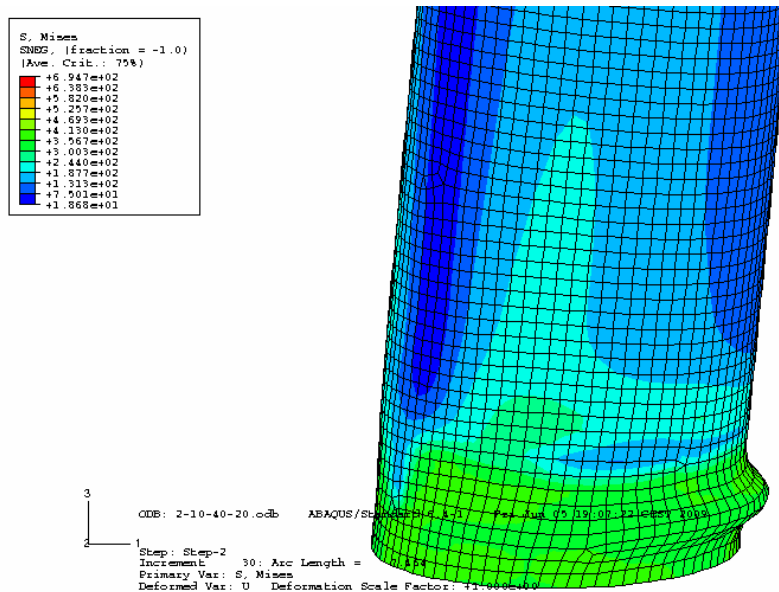
**Taula 7.17: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 18846 kN						
2-10-40-20						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-21,48	0,00	-0,02	#DIV/0!	79,20	#DIV/0!
0,05	368144,00	5,00	368,14	73,63	79,20	0,93
0,10	736306,00	10,00	736,31	73,63	79,20	0,93
0,18	1288540,00	17,50	1288,54	73,63	79,20	0,93
0,29	2116840,00	28,75	2116,84	73,63	79,20	0,93
0,46	3358060,00	45,63	3358,06	73,60	79,20	0,93
0,52	4008850,00	51,95	4008,85	77,16	79,20	0,97
0,58	4460530,00	58,28	4460,53	76,53	79,20	0,97
0,65	4770360,00	64,61	4770,36	73,83	79,20	0,93
0,71	4992240,00	70,94	4992,24	70,38	79,20	0,89
0,77	5144240,00	77,27	5144,24	66,58	79,20	0,84
0,84	5229710,00	83,59	5229,71	62,56	79,20	0,79
0,90	5267080,00	89,92	5267,08	58,57	79,20	0,74
0,99	5264080,00	99,41	5264,08	52,95	79,20	0,67
1,14	5188810,00	113,65	5188,81	45,66	79,20	0,58
1,35	4999390,00	135,01	4999,39	37,03	79,20	0,47
1,56	4763480,00	156,37	4763,48	30,46	79,20	0,38
1,78	4511230,00	177,73	4511,23	25,38	79,20	0,32
1,99	4262690,00	199,08	4262,69	21,41	79,20	0,27
2,20	4025870,00	220,44	4025,87	18,26	79,20	0,23
2,42	3802380,00	241,80	3802,38	15,73	79,20	0,20
2,74	3490140,00	273,83	3490,14	12,75	79,20	0,16
3,06	3205420,00	305,87	3205,42	10,48	79,20	0,13
3,38	2944890,00	337,91	2944,89	8,72	79,20	0,11
3,86	2589020,00	385,96	2589,02	6,71	79,20	0,08
4,34	2268880,00	434,01	2268,88	5,23	79,20	0,07
4,82	1977930,00	482,07	1977,93	4,10	79,20	0,05
5,30	1710390,00	530,12	1710,39	3,23	79,20	0,04
6,02	1342030,00	602,20	1342,03	2,23	79,20	0,03
6,74	1005930,00	674,29	1005,93	1,49	79,20	0,02
7,46	694034,00	746,37	694,03	0,93	79,20	0,01





**Figura 7.35: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 4 i càrrega del 20%.**

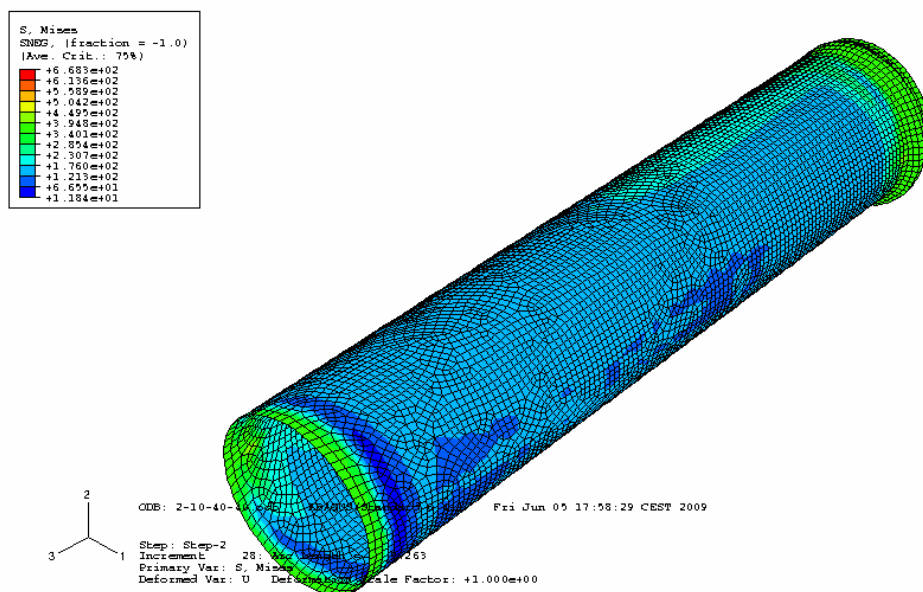


**Figura 7.36: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 4 i càrrega del 20%.**

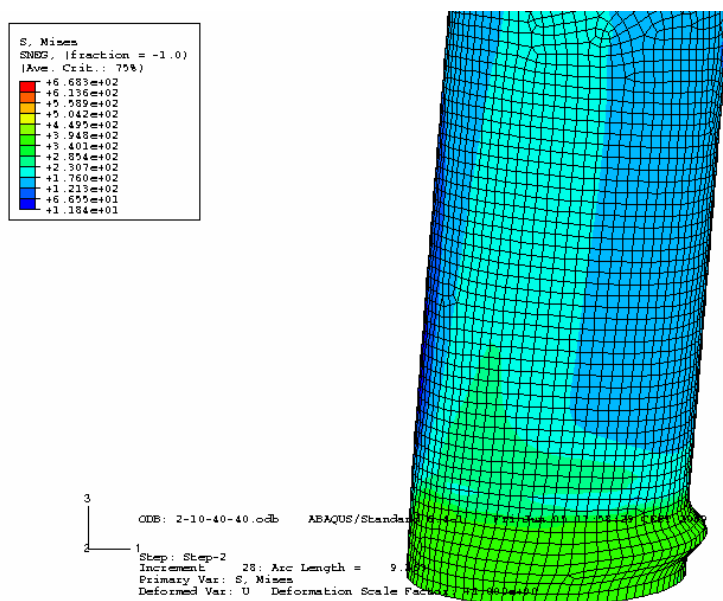
Càrrega del 40 %:

**Taula 7.18: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 37691 kN						
2-10-40-40						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-43,17	0,00	-0,04	#DIV/0!	79,20	#DIV/0!
0,05	357745,00	5,00	357,75	71,55	79,20	0,90
0,10	715528,00	10,00	715,53	71,55	79,20	0,90
0,18	1252190,00	17,50	1252,19	71,55	79,20	0,90
0,29	2056900,00	28,75	2056,90	71,54	79,20	0,90
0,46	3105430,00	45,63	3105,43	68,06	79,20	0,86
0,63	3568800,00	62,50	3568,80	57,10	79,20	0,72
0,79	3778210,00	79,38	3778,21	47,60	79,20	0,60
0,96	3854420,00	96,25	3854,42	40,05	79,20	0,51
1,13	3843320,00	113,13	3843,32	33,97	79,20	0,43
1,30	3769440,00	130,00	3769,44	29,00	79,20	0,37
1,47	3644220,00	146,88	3644,22	24,81	79,20	0,31
1,64	3474430,00	163,75	3474,43	21,22	79,20	0,27
1,81	3277740,00	180,63	3277,74	18,15	79,20	0,23
1,98	3067380,00	197,50	3067,38	15,53	79,20	0,20
2,14	2851920,00	214,38	2851,92	13,30	79,20	0,17
2,31	2637080,00	231,25	2637,08	11,40	79,20	0,14
2,48	2426550,00	248,13	2426,55	9,78	79,20	0,12
2,65	2221830,00	265,00	2221,83	8,38	79,20	0,11
2,90	1926400,00	290,31	1926,40	6,64	79,20	0,08
3,28	1512120,00	328,28	1512,12	4,61	79,20	0,06
3,85	953010,00	385,23	953,01	2,47	79,20	0,03
4,42	458703,00	442,19	458,70	1,04	79,20	0,01
4,99	14334,50	499,14	14,33	0,03	79,20	0,00
5,85	-585618,00	584,57	-585,62	-1,00	79,20	-0,01
6,70	-1123970,00	670,00	-1123,97	-1,68	79,20	-0,02
7,55	-1617190,00	755,43	-1617,19	-2,14	79,20	-0,03
8,41	-2076860,00	840,86	-2076,86	-2,47	79,20	-0,03
9,26	-2510990,00	926,29	-2510,99	-2,71	79,20	-0,03



**Figura 7.37: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 4 i càrrega del 40%.**

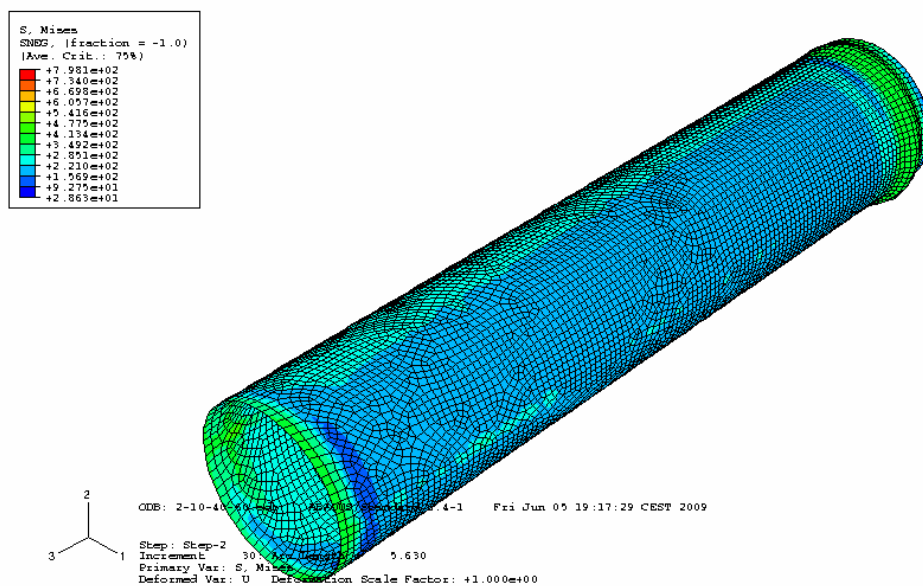


**Figura 7.38: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 4 i càrrega del 40%.**

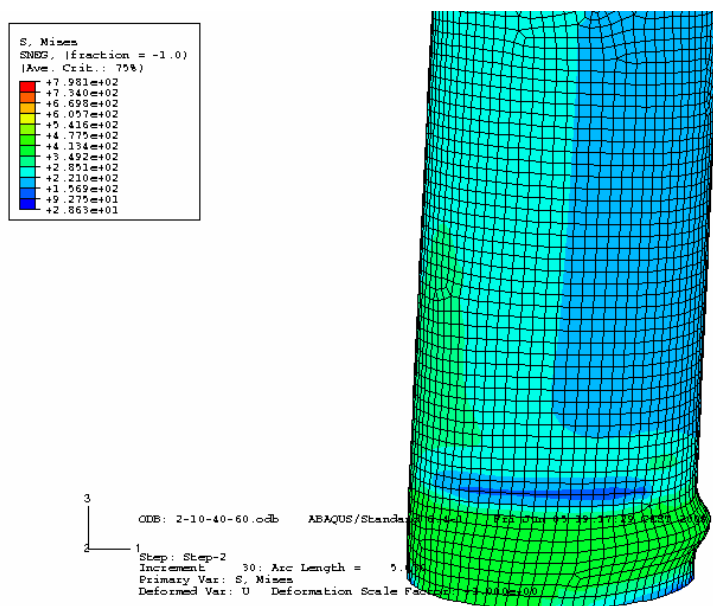
Càrrega del 60 %:

**Taula 7.19: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 56537 kN						
2-10-40-60						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	27052,00	0,00	27,05	#DIV/0!	79,20	#DIV/0!
0,05	368880,00	5,00	368,88	73,78	79,20	0,93
0,10	710650,00	10,00	710,65	71,07	79,20	0,90
0,18	1222760,00	17,50	1222,76	69,87	79,20	0,88
0,29	1896210,00	28,75	1896,21	65,96	79,20	0,83
0,40	2186420,00	40,00	2186,42	54,66	79,20	0,69
0,51	2311730,00	51,25	2311,73	45,11	79,20	0,57
0,63	2354110,00	62,50	2354,11	37,67	79,20	0,48
0,74	2342710,00	73,75	2342,71	31,77	79,20	0,40
0,85	2291440,00	85,00	2291,44	26,96	79,20	0,34
1,02	2152520,00	101,88	2152,52	21,13	79,20	0,27
1,19	1962150,00	118,75	1962,15	16,52	79,20	0,21
1,36	1733650,00	135,63	1733,65	12,78	79,20	0,16
1,53	1476560,00	152,50	1476,56	9,68	79,20	0,12
1,69	1202400,00	169,38	1202,40	7,10	79,20	0,09
1,86	921683,00	186,25	921,68	4,95	79,20	0,06
2,03	641315,00	203,13	641,32	3,16	79,20	0,04
2,20	366063,00	220,00	366,06	1,66	79,20	0,02
2,37	97253,10	236,88	97,25	0,41	79,20	0,01
2,62	-288898,00	262,19	-288,90	-1,10	79,20	-0,01
3,00	-829215,00	300,16	-829,22	-2,76	79,20	-0,03
3,38	-1322850,00	338,13	-1322,85	-3,91	79,20	-0,05
3,76	-1776200,00	376,09	-1776,20	-4,72	79,20	-0,06
4,14	-2196840,00	414,06	-2196,84	-5,31	79,20	-0,07
4,52	-2589900,00	452,03	-2589,90	-5,73	79,20	-0,07
4,90	-2956520,00	490,00	-2956,52	-6,03	79,20	-0,08
5,47	-3484850,00	546,95	-3484,85	-6,37	79,20	-0,08
5,51	-3493150,00	550,51	-3493,15	-6,35	79,20	-0,08
5,54	-3501330,00	554,07	-3501,33	-6,32	79,20	-0,08
5,58	-3509510,00	557,63	-3509,51	-6,29	79,20	-0,08
5,63	-3521870,00	562,97	-3521,87	-6,26	79,20	-0,08



**Figura 7.39: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 4 i càrrega del 60%.**

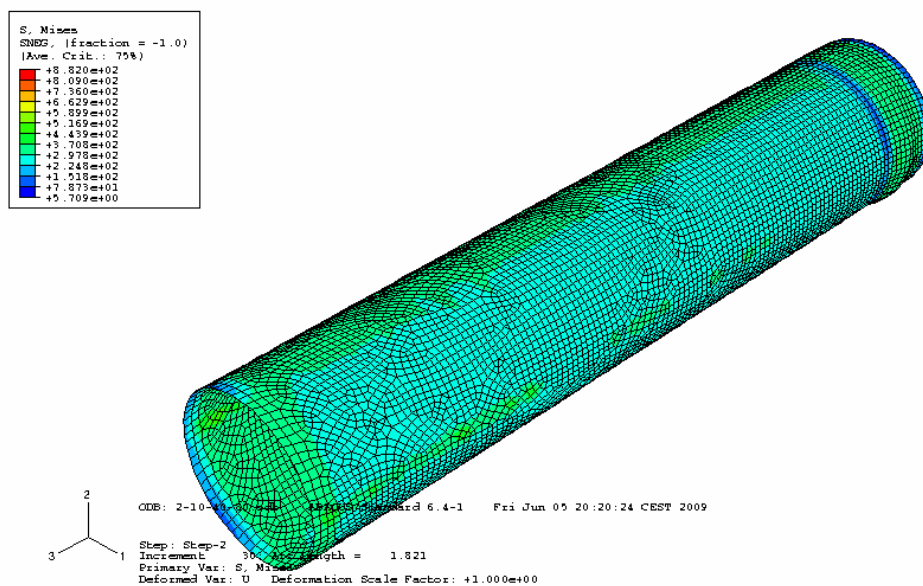


**Figura 7.40: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 4 i càrrega del 60%.**

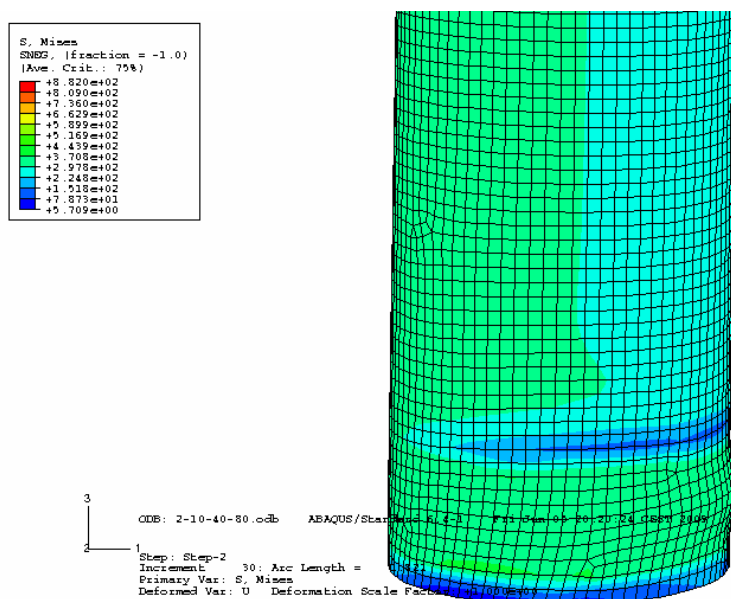
Càrrega del 80 %:

**Taula 7.20: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

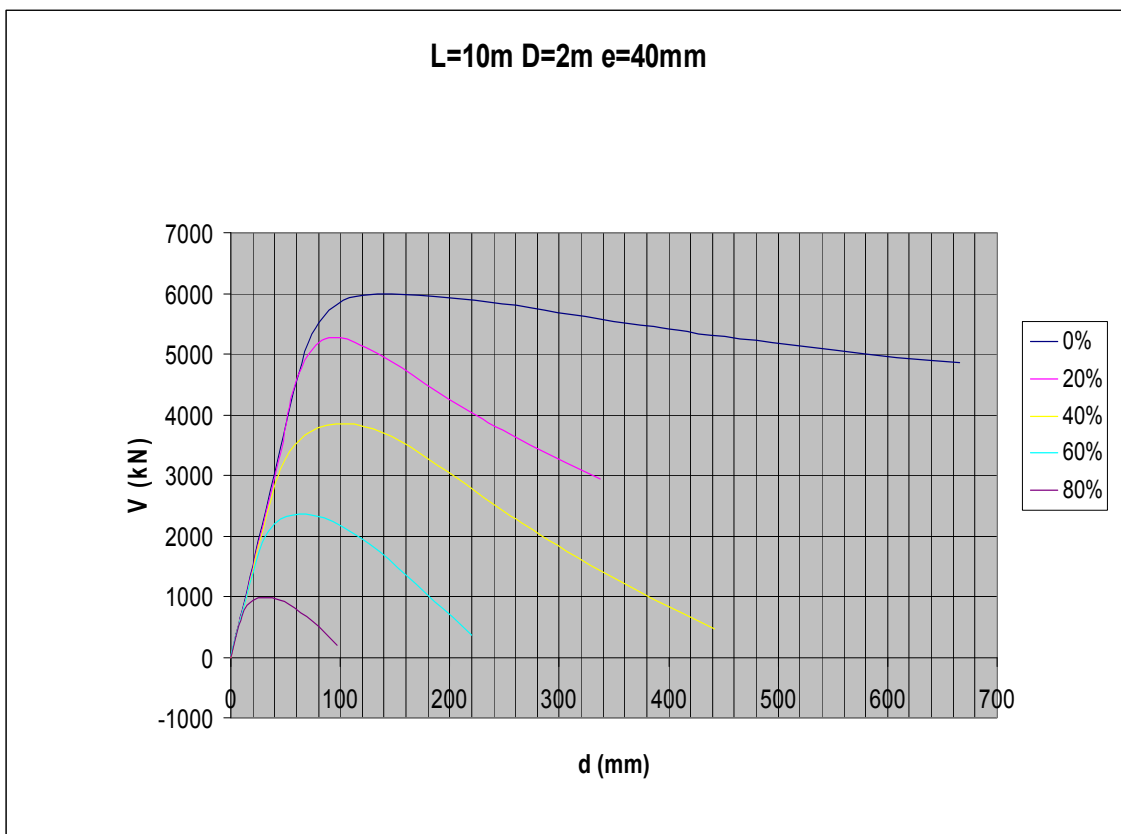
Ned = 75383 kN						
2-10-40-80						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-93,41	0,00	-0,09	#DIV/0!	79,20	#DIV/0!
0,05	336015,00	5,00	336,02	67,20	79,20	0,85
0,10	663098,00	10,00	663,10	66,31	79,20	0,84
0,15	859974,00	15,00	859,97	57,33	79,20	0,72
0,20	939866,00	20,00	939,87	46,99	79,20	0,59
0,25	975165,00	25,00	975,17	39,01	79,20	0,49
0,30	985916,00	30,00	985,92	32,86	79,20	0,41
0,38	971371,00	37,50	971,37	25,90	79,20	0,33
0,45	930464,00	45,00	930,46	20,68	79,20	0,26
0,53	868470,00	52,50	868,47	16,54	79,20	0,21
0,64	740979,00	63,75	740,98	11,62	79,20	0,15
0,75	581039,00	75,00	581,04	7,75	79,20	0,10
0,86	395827,00	86,25	395,83	4,59	79,20	0,06
0,98	190622,00	97,50	190,62	1,96	79,20	0,02
1,14	-154981,00	114,38	-154,98	-1,36	79,20	-0,02
1,31	-532720,00	131,25	-532,72	-4,06	79,20	-0,05
1,48	-925321,00	148,13	-925,32	-6,25	79,20	-0,08
1,65	-1323790,00	165,00	-1323,79	-8,02	79,20	-0,10
1,69	-1422750,00	169,22	-1422,75	-8,41	79,20	-0,11
1,73	-1523150,00	173,44	-1523,15	-8,78	79,20	-0,11
1,80	-1685090,00	179,77	-1685,09	-9,37	79,20	-0,12
1,81	-1733050,00	181,35	-1733,05	-9,56	79,20	-0,12
1,82	-1747230,00	181,74	-1747,23	-9,61	79,20	-0,12
1,82	-1757610,00	181,89	-1757,61	-9,66	79,20	-0,12
1,82	-1765270,00	182,04	-1765,27	-9,70	79,20	-0,12
1,82	-1765320,00	182,08	-1765,32	-9,70	79,20	-0,12
1,82	-1765350,00	182,11	-1765,35	-9,69	79,20	-0,12
1,82	-1765360,00	182,13	-1765,36	-9,69	79,20	-0,12
1,82	-1765370,00	182,13	-1765,37	-9,69	79,20	-0,12
1,82	-1765390,00	182,14	-1765,39	-9,69	79,20	-0,12
1,82	-1765410,00	182,14	-1765,41	-9,69	79,20	-0,12



**Figura 7.41: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 4 i càrrega del 80%.**



**Figura 7.42: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 4 i càrrega del 80%.**



**Figura 7.43: Representació gràfica del comportament de la Peça 4 per a les càrregues del 0%, 20%, 40%, 60% i 80%.**

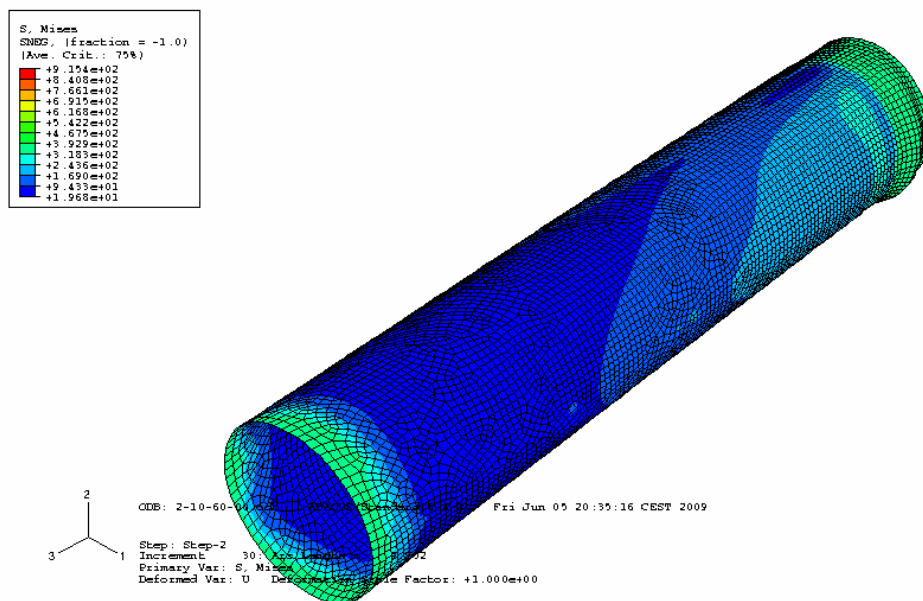


Peça 5:

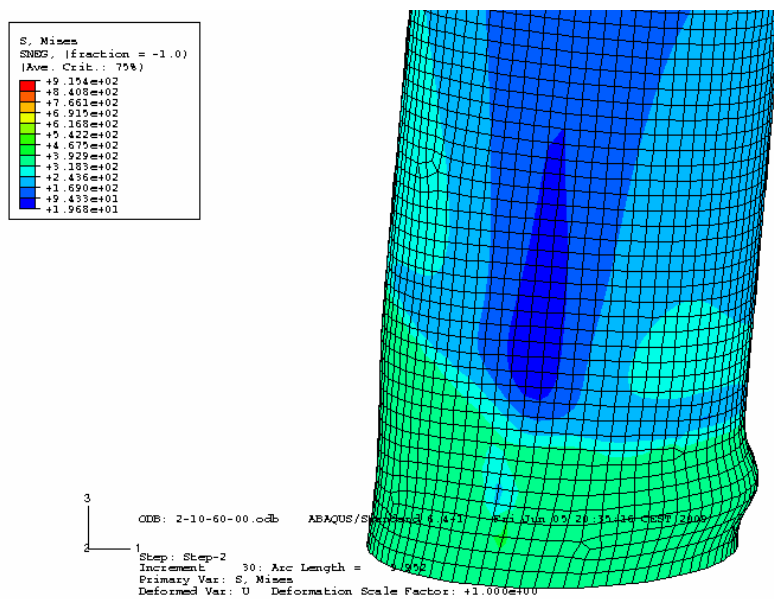
Càrrega del 0 %:

**Taula 7.21: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned =						
2-10-60-00						
v	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	118,86	#DIV/0!
0,05	576261,00	5,00	576,26	115,25	118,86	0,97
0,10	1152520,00	10,00	1152,52	115,25	118,86	0,97
0,18	2016900,00	17,50	2016,90	115,25	118,86	0,97
0,29	3313430,00	28,75	3313,43	115,25	118,86	0,97
0,46	5258120,00	45,63	5258,12	115,25	118,86	0,97
0,71	7934350,00	70,94	7934,35	111,85	118,86	0,94
0,96	8874170,00	96,25	8874,17	92,20	118,86	0,78
1,22	9138070,00	121,56	9138,07	75,17	118,86	0,63
1,47	9227910,00	146,88	9227,91	62,83	118,86	0,53
1,72	9266940,00	172,19	9266,94	53,82	118,86	0,45
1,98	9285330,00	197,50	9285,33	47,01	118,86	0,40
2,35	9291310,00	235,47	9291,31	39,46	118,86	0,33
2,92	9270820,00	292,42	9270,82	31,70	118,86	0,27
3,49	9224390,00	349,38	9224,39	26,40	118,86	0,22
4,06	9157890,00	406,33	9157,89	22,54	118,86	0,19
4,63	9074290,00	463,28	9074,29	19,59	118,86	0,16
5,20	8978840,00	520,23	8978,84	17,26	118,86	0,15
5,77	8879220,00	577,19	8879,22	15,38	118,86	0,13
6,34	8780170,00	634,14	8780,17	13,85	118,86	0,12
6,91	8684090,00	691,09	8684,09	12,57	118,86	0,11
7,48	8591630,00	748,05	8591,63	11,49	118,86	0,10
8,33	8459520,00	833,48	8459,52	10,15	118,86	0,09
9,19	8338200,00	918,91	8338,20	9,07	118,86	0,08
9,40	8310250,00	940,26	8310,25	8,84	118,86	0,07
9,62	8282710,00	961,62	8282,71	8,61	118,86	0,07
9,70	8267480,00	969,63	8267,48	8,53	118,86	0,07
9,82	8244370,00	981,64	8244,37	8,40	118,86	0,07
9,86	8230180,00	986,15	8230,18	8,35	118,86	0,07
9,91	8213950,00	990,65	8213,95	8,29	118,86	0,07
9,95	8196220,00	995,16	8196,22	8,24	118,86	0,07



**Figura 7.44: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 0%.**

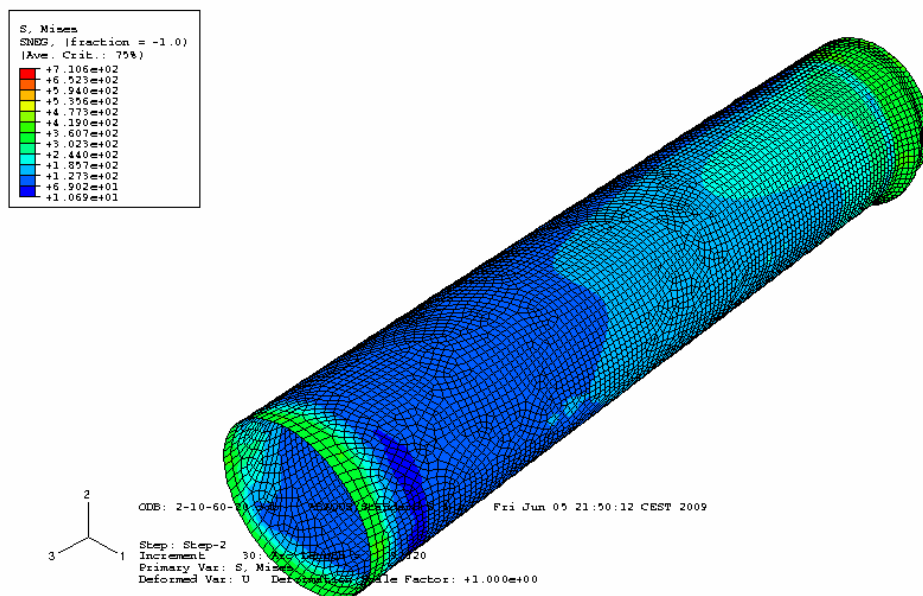


**Figura 7.45: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 0%.**

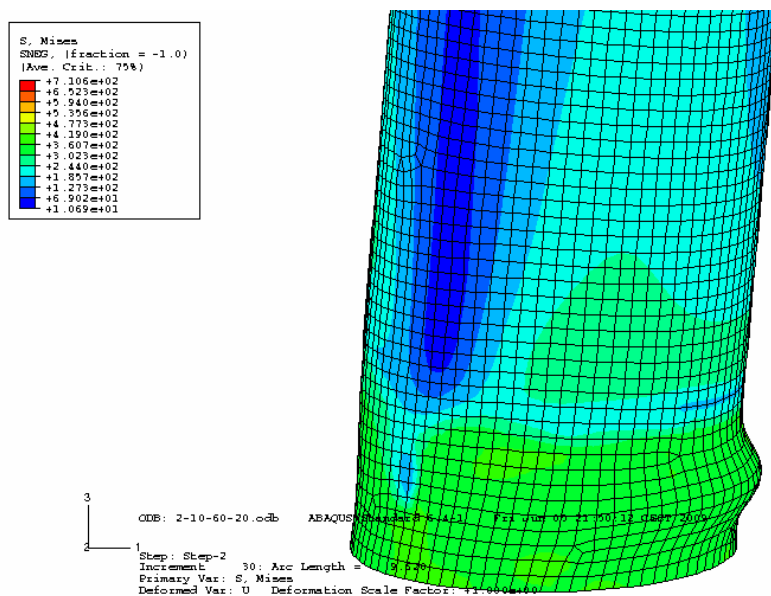
Càrrega del 20 %:

**Taula 7.22: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 28269 kN						
2-10-60-20						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-26,28	0,00	-0,03	#DIV/0!	118,86	#DIV/0!
0,05	560712,00	5,00	560,71	112,14	118,86	0,94
0,10	1121450,00	10,00	1121,45	112,15	118,86	0,94
0,18	1962540,00	17,50	1962,54	112,15	118,86	0,94
0,29	3224150,00	28,75	3224,15	112,14	118,86	0,94
0,46	5113100,00	45,63	5113,10	112,07	118,86	0,94
0,71	7178420,00	70,94	7178,42	101,19	118,86	0,85
0,96	8023470,00	96,25	8023,47	83,36	118,86	0,70
1,22	8242200,00	121,56	8242,20	67,80	118,86	0,57
1,47	8251070,00	146,88	8251,07	56,18	118,86	0,47
1,72	8192880,00	172,19	8192,88	47,58	118,86	0,40
1,98	8105620,00	197,50	8105,62	41,04	118,86	0,35
2,23	8000240,00	222,81	8000,24	35,91	118,86	0,30
2,48	7881170,00	248,13	7881,17	31,76	118,86	0,27
2,73	7750030,00	273,44	7750,03	28,34	118,86	0,24
2,99	7607860,00	298,75	7607,86	25,47	118,86	0,21
3,24	7455870,00	324,06	7455,87	23,01	118,86	0,19
3,49	7296530,00	349,38	7296,53	20,88	118,86	0,18
3,75	7132770,00	374,69	7132,77	19,04	118,86	0,16
4,00	6967010,00	400,00	6967,01	17,42	118,86	0,15
4,25	6800560,00	425,31	6800,56	15,99	118,86	0,13
4,51	6634750,00	450,63	6634,75	14,72	118,86	0,12
4,89	6386860,00	488,59	6386,86	13,07	118,86	0,11
5,46	6022030,00	545,55	6022,03	11,04	118,86	0,09
6,31	5497300,00	630,98	5497,30	8,71	118,86	0,07
7,16	5005710,00	716,41	5005,71	6,99	118,86	0,06
8,02	4543890,00	801,84	4543,89	5,67	118,86	0,05
8,87	4108270,00	887,27	4108,27	4,63	118,86	0,04
9,09	4003830,00	908,62	4003,83	4,41	118,86	0,04
9,30	3900440,00	929,98	3900,44	4,19	118,86	0,04
9,62	3747140,00	962,02	3747,14	3,90	118,86	0,03



**Figura 7.46: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 20%.**

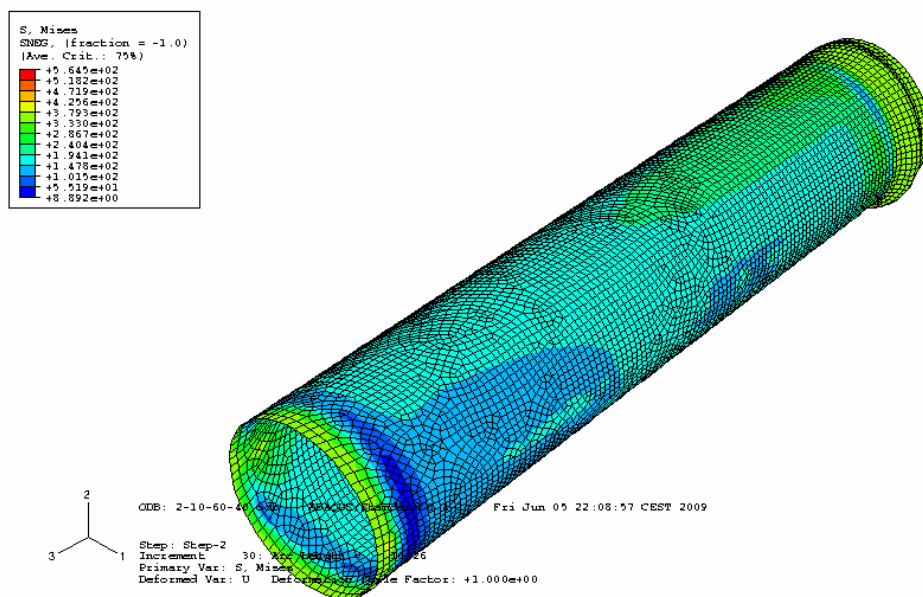


**Figura 7.47: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 20%.**

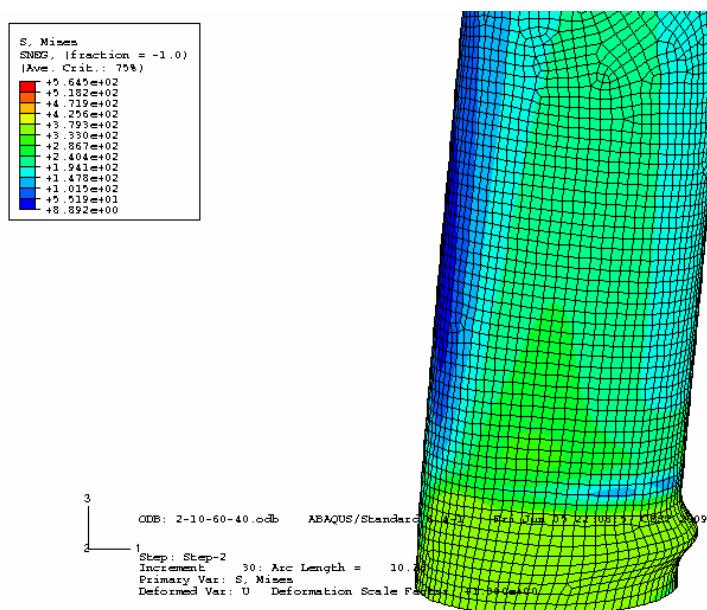
Càrrega del 40 %:

**Taula 7.23: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 56538 kN						
2-10-60-40						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-52,82	0,00	-0,05	#DIV/0!	118,86	#DIV/0!
0,05	545134,00	5,00	545,13	109,03	118,86	0,92
0,10	1090320,00	10,00	1090,32	109,03	118,86	0,92
0,18	1908080,00	17,50	1908,08	109,03	118,86	0,92
0,29	3134050,00	28,75	3134,05	109,01	118,86	0,92
0,46	4746080,00	45,63	4746,08	104,02	118,86	0,88
0,63	5525060,00	62,50	5525,06	88,40	118,86	0,74
0,79	5938590,00	79,38	5938,59	74,82	118,86	0,63
0,96	6175060,00	96,25	6175,06	64,16	118,86	0,54
1,13	6299440,00	113,13	6299,44	55,69	118,86	0,47
1,30	6335400,00	130,00	6335,40	48,73	118,86	0,41
1,47	6286760,00	146,88	6286,76	42,80	118,86	0,36
1,72	6124720,00	172,19	6124,72	35,57	118,86	0,30
2,10	5789130,00	210,16	5789,13	27,55	118,86	0,23
2,48	5395570,00	248,13	5395,57	21,75	118,86	0,18
2,86	4960900,00	286,09	4960,90	17,34	118,86	0,15
3,24	4504790,00	324,06	4504,79	13,90	118,86	0,12
3,62	4044230,00	362,03	4044,23	11,17	118,86	0,09
4,00	3589550,00	400,00	3589,55	8,97	118,86	0,08
4,38	3146660,00	437,97	3146,66	7,18	118,86	0,06
4,76	2717550,00	475,94	2717,55	5,71	118,86	0,05
5,14	2303840,00	513,91	2303,84	4,48	118,86	0,04
5,71	1708960,00	570,86	1708,96	2,99	118,86	0,03
6,28	1145930,00	627,81	1145,93	1,83	118,86	0,02
6,85	610411,00	684,77	610,41	0,89	118,86	0,01
7,42	98758,50	741,72	98,76	0,13	118,86	0,00
7,99	-392137,00	798,67	-392,14	-0,49	118,86	0,00
8,56	-865329,00	855,63	-865,33	-1,01	118,86	-0,01
9,13	-1323170,00	912,58	-1323,17	-1,45	118,86	-0,01
9,70	-1767910,00	969,53	-1767,91	-1,82	118,86	-0,02
10,26	-2201330,00	1026,48	-2201,33	-2,14	118,86	-0,02



**Figura 7.48: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 40%.**

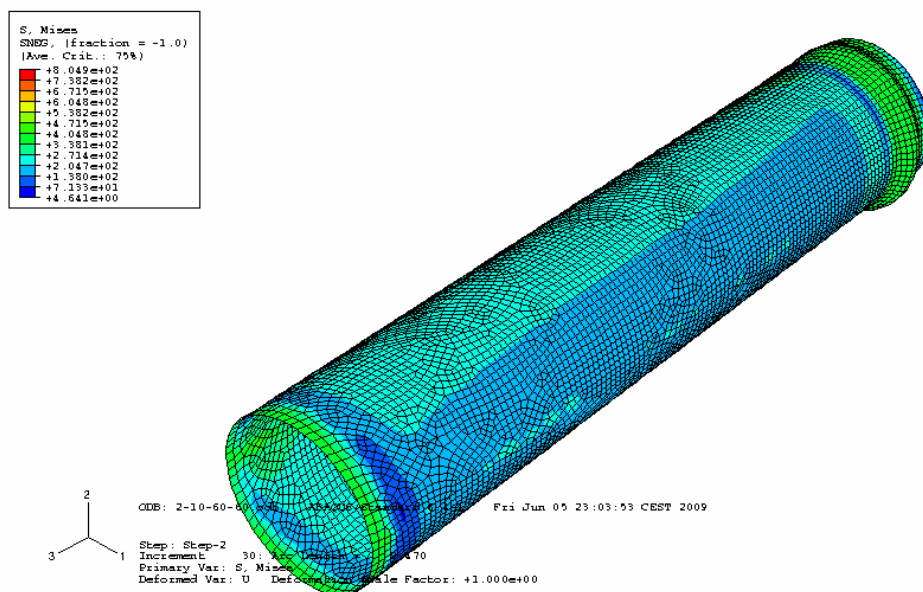


**Figura 7.49: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 40%.**

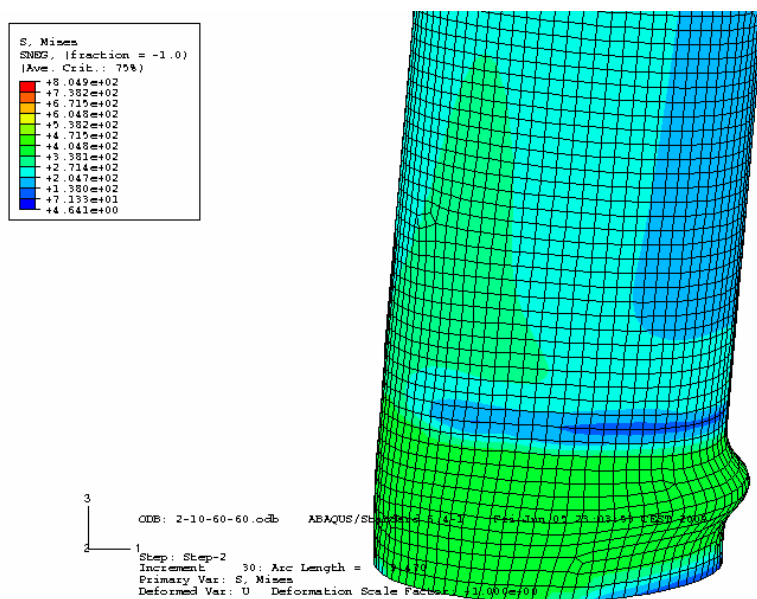
Càrrega del 60 %:

**Taula 7.24: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 84807 kN						
2-10-60-60						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-79,63	0,00	-0,08	#DIV/0!	118,86	#DIV/0!
0,05	529525,00	5,00	529,53	105,91	118,86	0,89
0,10	1059130,00	10,00	1059,13	105,91	118,86	0,89
0,18	1852260,00	17,50	1852,26	105,84	118,86	0,89
0,29	2906430,00	28,75	2906,43	101,09	118,86	0,85
0,40	3405480,00	40,00	3405,48	85,14	118,86	0,72
0,51	3654670,00	51,25	3654,67	71,31	118,86	0,60
0,63	3790470,00	62,50	3790,47	60,65	118,86	0,51
0,74	3858660,00	73,75	3858,66	52,32	118,86	0,44
0,85	3881160,00	85,00	3881,16	45,66	118,86	0,38
0,96	3869330,00	96,25	3869,33	40,20	118,86	0,34
1,08	3830430,00	107,50	3830,43	35,63	118,86	0,30
1,24	3729500,00	124,38	3729,50	29,99	118,86	0,25
1,50	3502180,00	149,69	3502,18	23,40	118,86	0,20
1,88	3037500,00	187,66	3037,50	16,19	118,86	0,14
2,26	2476550,00	225,63	2476,55	10,98	118,86	0,09
2,64	1846320,00	263,59	1846,32	7,00	118,86	0,06
3,02	1190180,00	301,56	1190,18	3,95	118,86	0,03
3,40	539769,00	339,53	539,77	1,59	118,86	0,01
3,78	-91300,00	377,50	-91,30	-0,24	118,86	0,00
4,15	-700259,00	415,47	-700,26	-1,69	118,86	-0,01
4,53	-1286270,00	453,44	-1286,27	-2,84	118,86	-0,02
4,91	-1850000,00	491,41	-1850,00	-3,76	118,86	-0,03
5,48	-2659260,00	548,36	-2659,26	-4,85	118,86	-0,04
6,05	-3427740,00	605,31	-3427,74	-5,66	118,86	-0,05
6,62	-4162020,00	662,27	-4162,02	-6,28	118,86	-0,05
7,19	-4867720,00	719,22	-4867,72	-6,77	118,86	-0,06
7,76	-5549780,00	776,17	-5549,78	-7,15	118,86	-0,06
8,33	-6211870,00	833,13	-6211,87	-7,46	118,86	-0,06
8,90	-6858660,00	890,08	-6858,66	-7,71	118,86	-0,06
9,47	-7493650,00	947,03	-7493,65	-7,91	118,86	-0,07



**Figura 7.50: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 60%.**



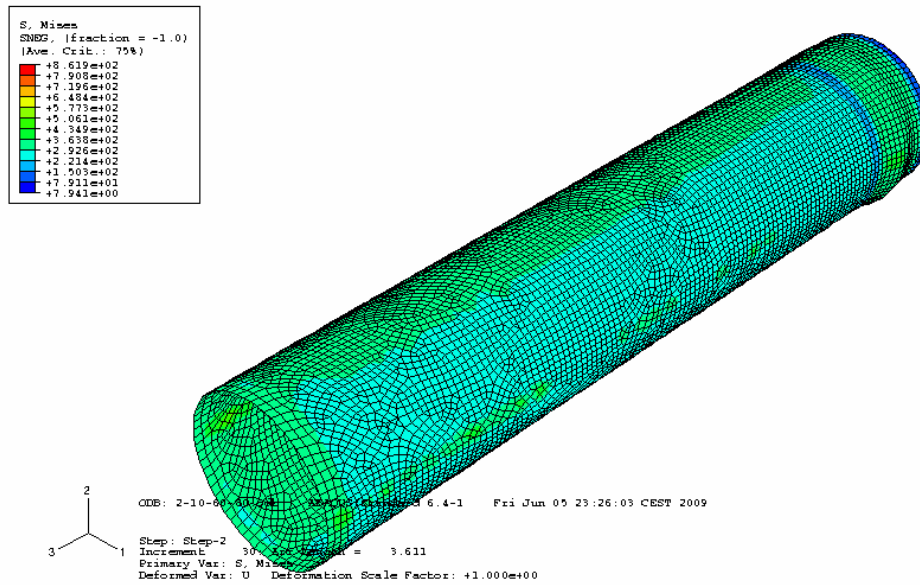
**Figura 7.51: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 60%.**



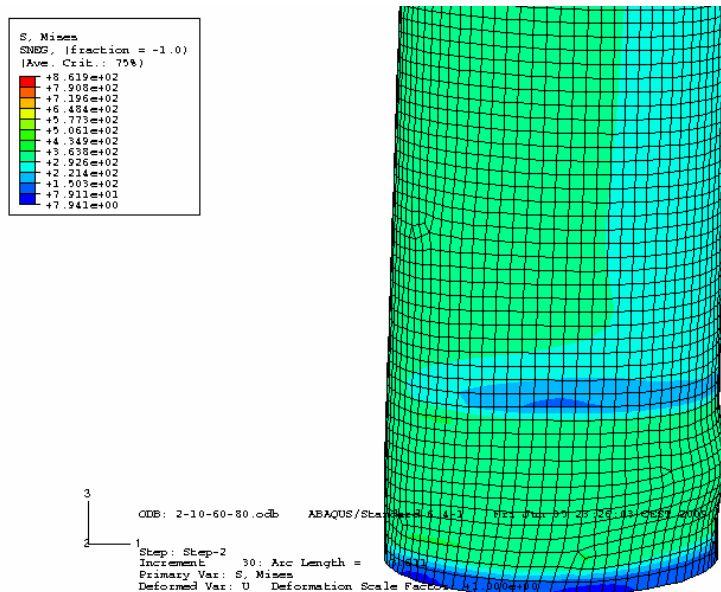
Càrrega del 80 %:

**Taula 7.25: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

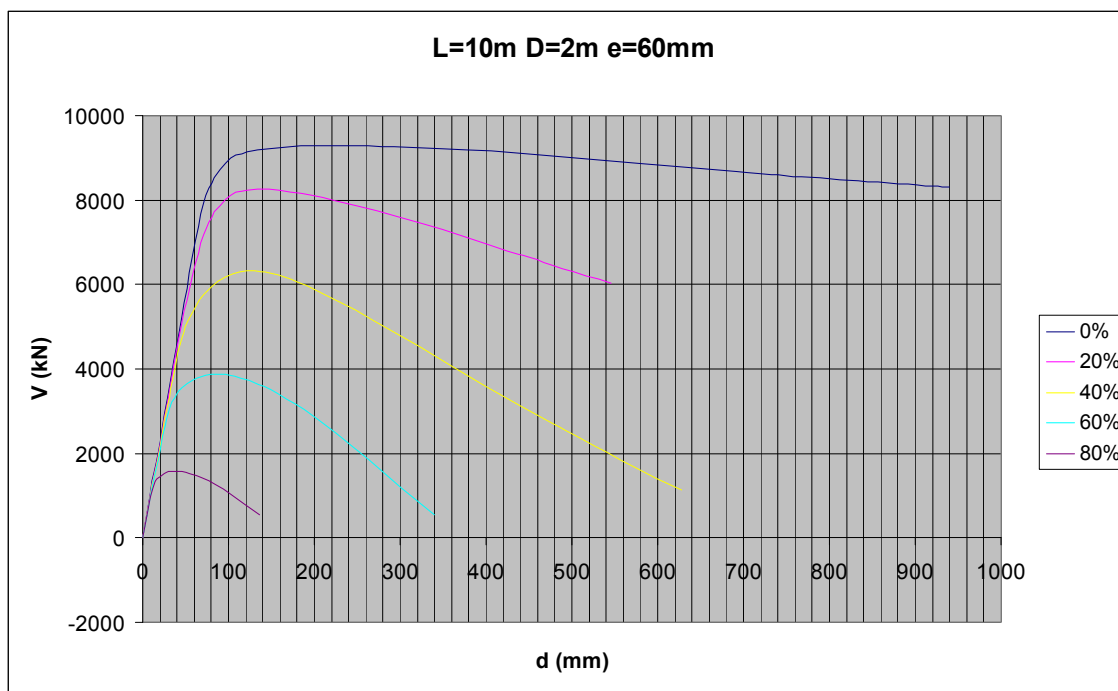
Ned = 113076 kN						
2-10-60-80						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-112,34	0,00	-0,11	#DIV/0!	118,86	#DIV/0!
0,05	511837,00	5,00	511,84	102,37	118,86	0,86
0,10	1009970,00	10,00	1009,97	101,00	118,86	0,85
0,15	1323720,00	15,00	1323,72	88,25	118,86	0,74
0,20	1462250,00	20,00	1462,25	73,11	118,86	0,62
0,25	1532080,00	25,00	1532,08	61,28	118,86	0,52
0,30	1566940,00	30,00	1566,94	52,23	118,86	0,44
0,35	1580500,00	35,00	1580,50	45,16	118,86	0,38
0,43	1574580,00	42,50	1574,58	37,05	118,86	0,31
0,50	1547310,00	50,00	1547,31	30,95	118,86	0,26
0,58	1504440,00	57,50	1504,44	26,16	118,86	0,22
0,69	1417900,00	68,75	1417,90	20,62	118,86	0,17
0,86	1247860,00	85,63	1247,86	14,57	118,86	0,12
1,03	1040000,00	102,50	1040,00	10,15	118,86	0,09
1,19	800864,00	119,38	800,86	6,71	118,86	0,06
1,36	536099,00	136,25	536,10	3,93	118,86	0,03
1,53	250365,00	153,13	250,37	1,64	118,86	0,01
1,70	-52648,10	170,00	-52,65	-0,31	118,86	0,00
1,87	-370997,00	186,88	-371,00	-1,99	118,86	-0,02
2,12	-882591,00	212,19	-882,59	-4,16	118,86	-0,03
2,38	-1424310,00	237,50	-1424,31	-6,00	118,86	-0,05
2,63	-1983130,00	262,81	-1983,13	-7,55	118,86	-0,06
2,88	-2547040,00	288,13	-2547,04	-8,84	118,86	-0,07
3,13	-3110020,00	313,44	-3110,02	-9,92	118,86	-0,08
3,39	-3676400,00	338,75	-3676,40	-10,85	118,86	-0,09
3,45	-3818810,00	345,08	-3818,81	-11,07	118,86	-0,09
3,51	-3964120,00	351,41	-3964,12	-11,28	118,86	-0,09
3,61	-4199510,00	360,90	-4199,51	-11,64	118,86	-0,10
3,61	-4199290,00	361,05	-4199,29	-11,63	118,86	-0,10
3,61	-4199230,00	361,08	-4199,23	-11,63	118,86	-0,10
3,61	-4199230,00	361,09	-4199,23	-11,63	118,86	-0,10



**Figura 7.52: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 80%.**



**Figura 7.53: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 5 i càrrega del 80%.**



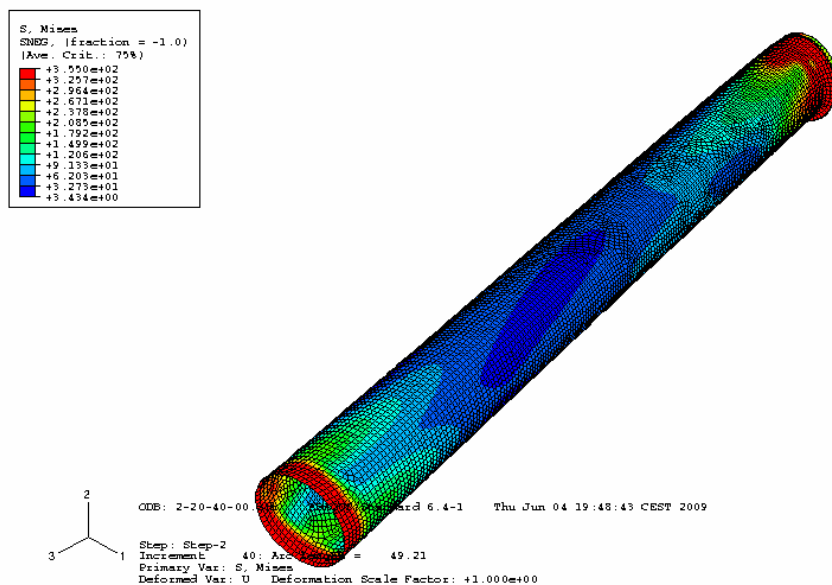
**Figura 7.54: Representació gràfica del comportament de la Peça 5 per a les càrregues del 0%, 20%, 40%, 60% i 80%.**

*Peça 6:*

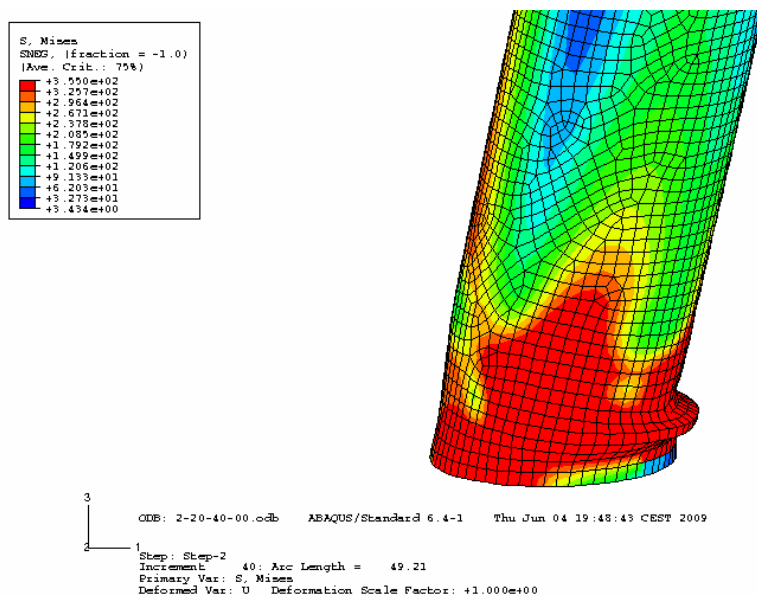
Càrrega del 0 %:

**Taula 7.26: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned =						
2-20-40-00						
v	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	9,90	#DIV/0!
0,05	51259,10	5,00	51,26	10,25	9,90	1,04
0,10	102518,00	10,00	102,52	10,25	9,90	1,04
0,18	179407,00	17,50	179,41	10,25	9,90	1,04
0,29	294739,00	28,75	294,74	10,25	9,90	1,04
0,46	467735,00	45,63	467,74	10,25	9,90	1,04
0,71	727222,00	70,94	727,22	10,25	9,90	1,04
1,09	1116430,00	108,91	1116,43	10,25	9,90	1,04
1,66	1699030,00	165,86	1699,03	10,24	9,90	1,03
2,51	2540470,00	251,29	2540,47	10,11	9,90	1,02
3,37	2906390,00	336,72	2906,39	8,63	9,90	0,87
3,58	2939090,00	358,08	2939,09	8,21	9,90	0,83
3,79	2961250,00	379,43	2961,25	7,80	9,90	0,79
4,01	2975580,00	400,79	2975,58	7,42	9,90	0,75
4,22	2985090,00	422,15	2985,09	7,07	9,90	0,71
4,44	2990730,00	443,51	2990,73	6,74	9,90	0,68
4,76	2993490,00	475,54	2993,49	6,29	9,90	0,64
5,24	2990020,00	523,60	2990,02	5,71	9,90	0,58
5,96	2972790,00	595,68	2972,79	4,99	9,90	0,50
7,04	2928420,00	703,80	2928,42	4,16	9,90	0,42
8,66	2836200,00	865,98	2836,20	3,28	9,90	0,33
10,28	2742770,00	1028,17	2742,77	2,67	9,90	0,27
11,90	2658340,00	1190,35	2658,34	2,23	9,90	0,23
13,53	2583730,00	1352,53	2583,73	1,91	9,90	0,19
15,15	2520510,00	1514,71	2520,51	1,66	9,90	0,17
16,77	2463780,00	1676,90	2463,78	1,47	9,90	0,15
18,39	2413520,00	1839,08	2413,52	1,31	9,90	0,13
20,01	2369920,00	2001,26	2369,92	1,18	9,90	0,12
21,63	2330850,00	2163,45	2330,85	1,08	9,90	0,11
23,26	2294800,00	2325,63	2294,80	0,99	9,90	0,10
24,88	2261400,00	2487,81	2261,40	0,91	9,90	0,09
27,31	2216580,00	2731,09	2216,58	0,81	9,90	0,08
29,74	2177290,00	2974,36	2177,29	0,73	9,90	0,07
32,18	2141840,00	3217,63	2141,84	0,67	9,90	0,07
34,61	2108910,00	3460,91	2108,91	0,61	9,90	0,06
37,04	2077530,00	3704,18	2077,53	0,56	9,90	0,06
39,47	2047270,00	3947,46	2047,27	0,52	9,90	0,05
41,91	2020090,00	4190,73	2020,09	0,48	9,90	0,05
44,34	1996340,00	4434,01	1996,34	0,45	9,90	0,05
46,77	1975760,00	4677,28	1975,76	0,42	9,90	0,04
49,21	1958150,00	4920,56	1958,15	0,40	9,90	0,04



**Figura 7.55: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 6 i càrrega del 0%.**

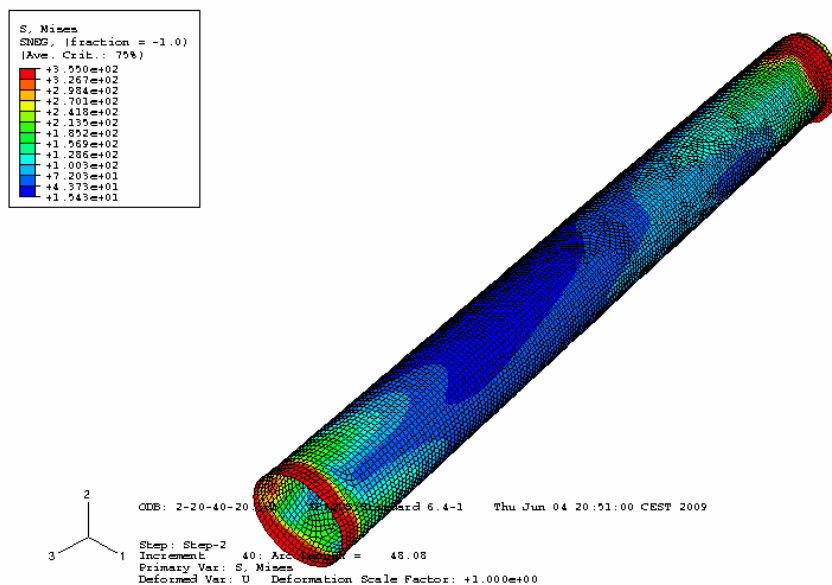


**Figura 7.56: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 6 i càrrega del 0%.**

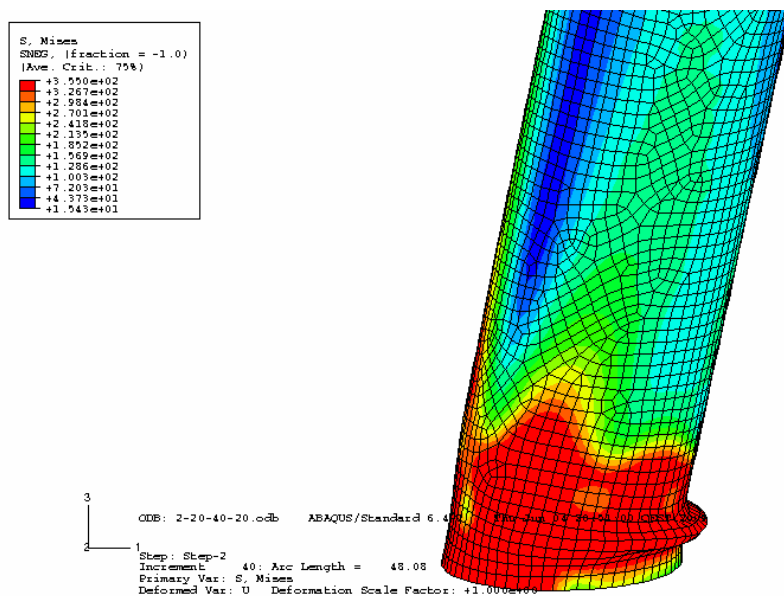
Càrrega del 20 %:

**Taula 7.27: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 17981 kN						
2-20-40-20						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-5,58	0,00	-0,01	#DIV/0!	9,90	#DIV/0!
0,05	48623,70	5,00	48,62	9,72	9,90	0,98
0,10	97252,80	10,00	97,25	9,73	9,90	0,98
0,18	170196,00	17,50	170,20	9,73	9,90	0,98
0,29	279611,00	28,75	279,61	9,73	9,90	0,98
0,46	443731,00	45,63	443,73	9,73	9,90	0,98
0,71	689903,00	70,94	689,90	9,73	9,90	0,98
1,09	1059130,00	108,91	1059,13	9,73	9,90	0,98
1,66	1611610,00	165,86	1611,61	9,72	9,90	0,98
2,51	2383770,00	251,29	2383,77	9,49	9,90	0,96
2,94	2607580,00	294,00	2607,58	8,87	9,90	0,90
3,37	2709820,00	336,72	2709,82	8,05	9,90	0,81
3,79	2743960,00	379,43	2743,96	7,23	9,90	0,73
4,22	2743080,00	422,15	2743,08	6,50	9,90	0,66
4,65	2723810,00	464,86	2723,81	5,86	9,90	0,59
5,08	2693630,00	507,58	2693,63	5,31	9,90	0,54
5,72	2634890,00	571,65	2634,89	4,61	9,90	0,47
6,36	2564240,00	635,72	2564,24	4,03	9,90	0,41
7,00	2485660,00	699,80	2485,66	3,55	9,90	0,36
7,64	2404750,00	763,87	2404,75	3,15	9,90	0,32
8,28	2323930,00	827,94	2323,93	2,81	9,90	0,28
8,92	2243840,00	892,01	2243,84	2,52	9,90	0,25
9,88	2128860,00	988,12	2128,86	2,15	9,90	0,22
11,32	1968420,00	1132,28	1968,42	1,74	9,90	0,18
13,49	1749280,00	1348,53	1749,28	1,30	9,90	0,13
15,65	1555410,00	1564,77	1555,41	0,99	9,90	0,10
17,81	1380440,00	1781,01	1380,44	0,78	9,90	0,08
19,97	1220340,00	1997,26	1220,34	0,61	9,90	0,06
22,14	1070580,00	2213,50	1070,58	0,48	9,90	0,05
24,30	929692,00	2429,75	929,69	0,38	9,90	0,04
26,46	795652,00	2645,99	795,65	0,30	9,90	0,03
28,62	666951,00	2862,23	666,95	0,23	9,90	0,02
30,78	542121,00	3078,48	542,12	0,18	9,90	0,02
32,95	421142,00	3294,72	421,14	0,13	9,90	0,01
35,11	303340,00	3510,97	303,34	0,09	9,90	0,01
37,27	188081,00	3727,21	188,08	0,05	9,90	0,01
39,43	75238,70	3943,45	75,24	0,02	9,90	0,00
41,60	-35646,70	4159,70	-35,65	-0,01	9,90	0,00
43,76	-144595,00	4375,94	-144,60	-0,03	9,90	0,00
45,92	-251733,00	4592,19	-251,73	-0,05	9,90	-0,01
48,08	-357295,00	4808,43	-357,30	-0,07	9,90	-0,01



**Figura 7.57: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 6 i càrrega del 20%.**



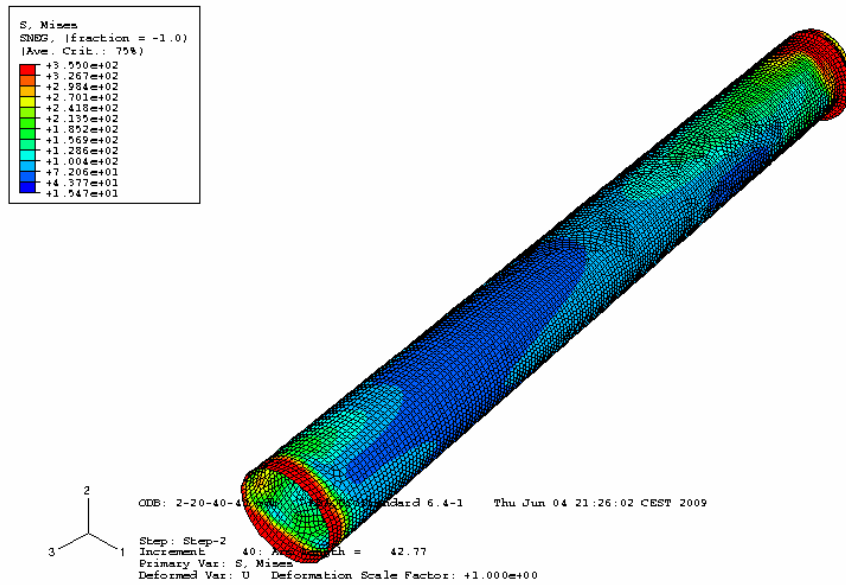
**Figura 7.58: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 6 i càrrega del 20%.**

Càrrega del 40 %:

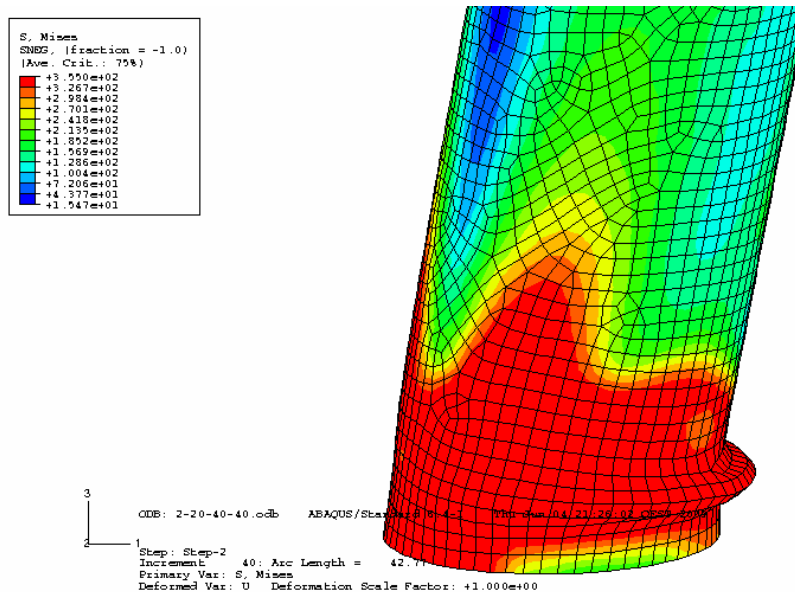
**Taula 7.28: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 35961,4 kN						
2-20-40-40						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-9,80	0,00	-0,01	#DIV/0!	9,90	#DIV/0!
0,05	45984,40	5,00	45,98	9,20	9,90	0,93
0,10	91978,60	10,00	91,98	9,20	9,90	0,93
0,18	160970,00	17,50	160,97	9,20	9,90	0,93
0,29	264456,00	28,75	264,46	9,20	9,90	0,93
0,46	419682,00	45,63	419,68	9,20	9,90	0,93
0,71	652514,00	70,94	652,51	9,20	9,90	0,93
1,09	1001690,00	108,91	1001,69	9,20	9,90	0,93
1,66	1523670,00	165,86	1523,67	9,19	9,90	0,93
2,51	2168980,00	251,29	2168,98	8,63	9,90	0,87
2,73	2267530,00	272,65	2267,53	8,32	9,90	0,84
2,94	2345680,00	294,00	2345,68	7,98	9,90	0,81
3,15	2398930,00	315,36	2398,93	7,61	9,90	0,77
3,37	2430150,00	336,72	2430,15	7,22	9,90	0,73
3,58	2443730,00	358,08	2443,73	6,82	9,90	0,69
3,79	2443730,00	379,43	2443,73	6,44	9,90	0,65
4,01	2433890,00	400,79	2433,89	6,07	9,90	0,61
4,22	2416720,00	422,15	2416,72	5,72	9,90	0,58
4,54	2381360,00	454,19	2381,36	5,24	9,90	0,53
5,02	2312930,00	502,24	2312,93	4,61	9,90	0,47
5,74	2185540,00	574,32	2185,54	3,81	9,90	0,38
6,46	2041550,00	646,40	2041,55	3,16	9,90	0,32
7,18	1893390,00	718,48	1893,39	2,64	9,90	0,27
7,91	1749000,00	790,56	1749,00	2,21	9,90	0,22
8,99	1540900,00	898,69	1540,90	1,71	9,90	0,17
10,07	1347540,00	1006,81	1347,54	1,34	9,90	0,14
11,15	1167180,00	1114,93	1167,18	1,05	9,90	0,11
12,77	914813,00	1277,11	914,81	0,72	9,90	0,07
14,39	682151,00	1439,30	682,15	0,47	9,90	0,05
16,01	464705,00	1601,48	464,71	0,29	9,90	0,03
18,45	160208,00	1844,75	160,21	0,09	9,90	0,01
20,88	-124078,00	2088,03	-124,08	-0,06	9,90	-0,01
23,31	-393432,00	2331,30	-393,43	-0,17	9,90	-0,02
25,75	-651515,00	2574,58	-651,52	-0,25	9,90	-0,03
28,18	-901158,00	2817,85	-901,16	-0,32	9,90	-0,03
30,61	-1144370,00	3061,12	-1144,37	-0,37	9,90	-0,04
33,04	-1382290,00	3304,40	-1382,29	-0,42	9,90	-0,04
35,48	-1615950,00	3547,67	-1615,95	-0,46	9,90	-0,05
37,91	-1846100,00	3790,95	-1846,10	-0,49	9,90	-0,05
40,34	-2073410,00	4034,22	-2073,41	-0,51	9,90	-0,05
42,78	-2298160,00	4277,50	-2298,16	-0,54	9,90	-0,05





**Figura 7.59: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 6 i càrrega del 40%.**

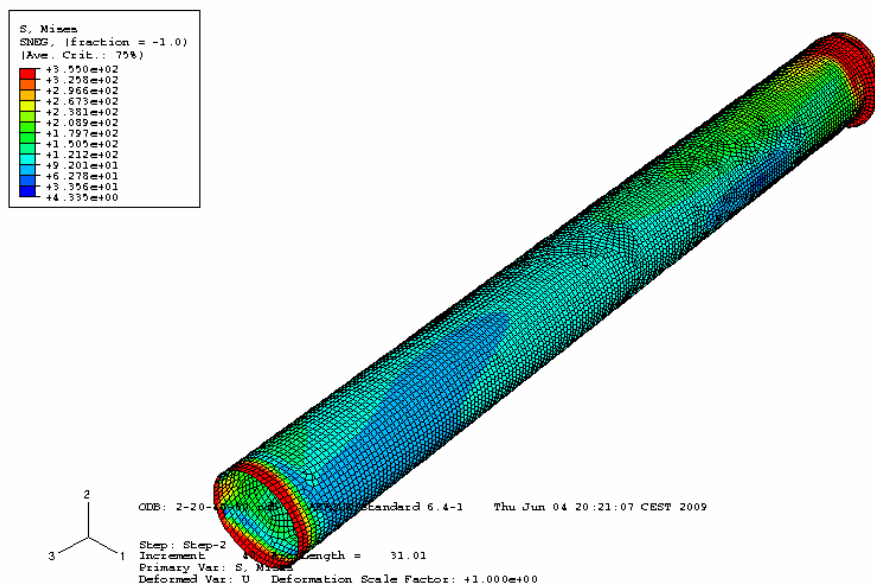


**Figura 7.60: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 6 i càrrega del 40%.**

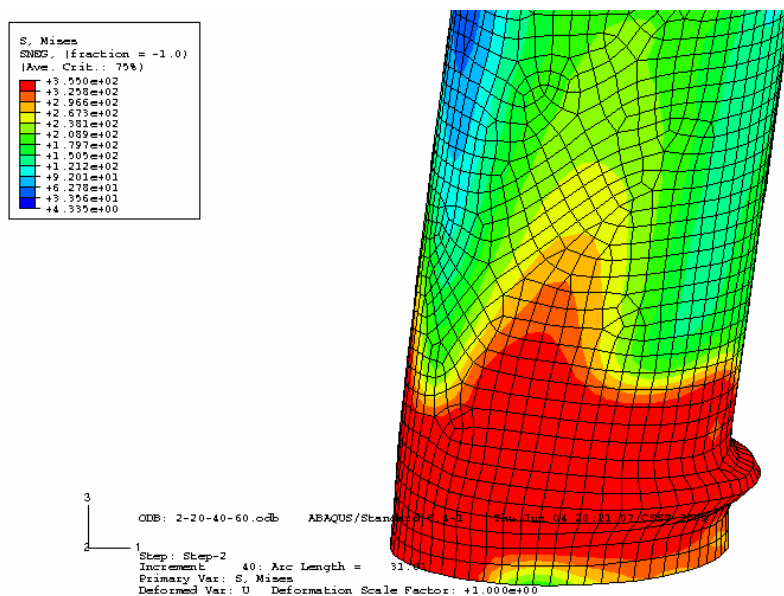
Càrrega del 60 %:

**Taula 7.29: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 53942 kN						
2-20-40-60						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-12,83	0,00	-0,01	#DIV/0!	9,90	#DIV/0!
0,05	43341,40	5,00	43,34	8,67	9,90	0,88
0,10	86695,50	10,00	86,70	8,67	9,90	0,88
0,18	151727,00	17,50	151,73	8,67	9,90	0,88
0,29	249272,00	28,75	249,27	8,67	9,90	0,88
0,46	395589,00	45,63	395,59	8,67	9,90	0,88
0,71	615054,00	70,94	615,05	8,67	9,90	0,88
1,09	943834,00	108,91	943,83	8,67	9,90	0,88
1,66	1434080,00	165,86	1434,08	8,65	9,90	0,87
2,51	1909690,00	251,29	1909,69	7,60	9,90	0,77
2,73	1970740,00	272,65	1970,74	7,23	9,90	0,73
2,94	2017040,00	294,00	2017,04	6,86	9,90	0,69
3,15	2049980,00	315,36	2049,98	6,50	9,90	0,66
3,37	2067860,00	336,72	2067,86	6,14	9,90	0,62
3,58	2068450,00	358,08	2068,45	5,78	9,90	0,58
3,79	2054230,00	379,43	2054,23	5,41	9,90	0,55
4,01	2028710,00	400,79	2028,71	5,06	9,90	0,51
4,22	1994940,00	422,15	1994,94	4,73	9,90	0,48
4,44	1955040,00	443,51	1955,04	4,41	9,90	0,45
4,76	1886570,00	475,54	1886,57	3,97	9,90	0,40
5,24	1767410,00	523,60	1767,41	3,38	9,90	0,34
5,72	1636290,00	571,65	1636,29	2,86	9,90	0,29
6,20	1500460,00	619,71	1500,46	2,42	9,90	0,24
6,68	1364770,00	667,76	1364,77	2,04	9,90	0,21
7,40	1165090,00	739,84	1165,09	1,57	9,90	0,16
8,12	975133,00	811,92	975,13	1,20	9,90	0,12
8,84	794549,00	884,00	794,55	0,90	9,90	0,09
9,92	538809,00	992,13	538,81	0,54	9,90	0,05
11,54	185305,00	1154,31	185,31	0,16	9,90	0,02
13,16	-139435,00	1316,49	-139,44	-0,11	9,90	-0,01
14,79	-441984,00	1478,67	-441,98	-0,30	9,90	-0,03
16,41	-727848,00	1640,86	-727,85	-0,44	9,90	-0,04
18,03	-1000150,00	1803,04	-1000,15	-0,55	9,90	-0,06
19,65	-1261890,00	1965,22	-1261,89	-0,64	9,90	-0,06
21,27	-1515380,00	2127,41	-1515,38	-0,71	9,90	-0,07
22,90	-1761990,00	2289,59	-1761,99	-0,77	9,90	-0,08
24,52	-2003040,00	2451,77	-2003,04	-0,82	9,90	-0,08
26,14	-2239610,00	2613,95	-2239,61	-0,86	9,90	-0,09
27,76	-2472410,00	2776,14	-2472,41	-0,89	9,90	-0,09
29,38	-2702430,00	2938,32	-2702,43	-0,92	9,90	-0,09
31,01	-2929850,00	3100,50	-2929,85	-0,94	9,90	-0,10



**Figura 7.61: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 6 i càrrega del 60%.**

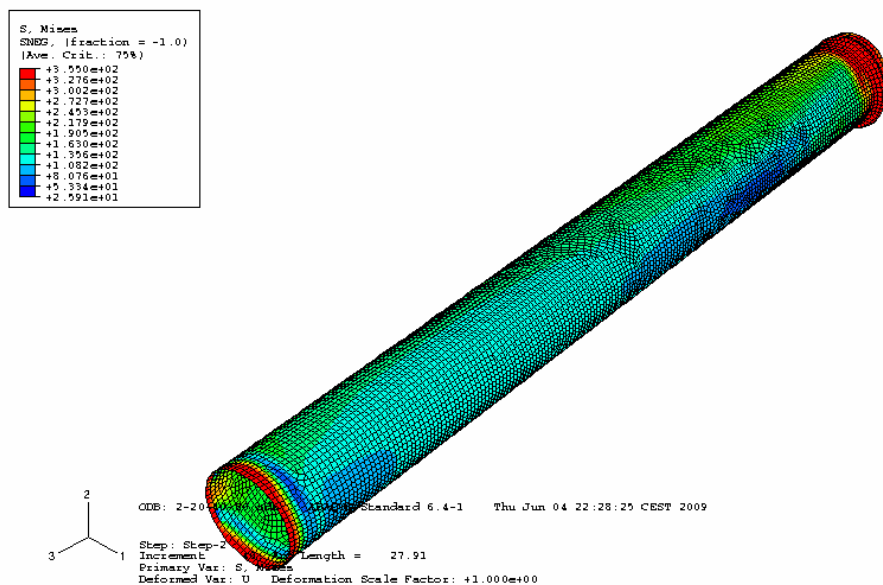


**Figura 7.62: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 6 i càrrega del 60%.**

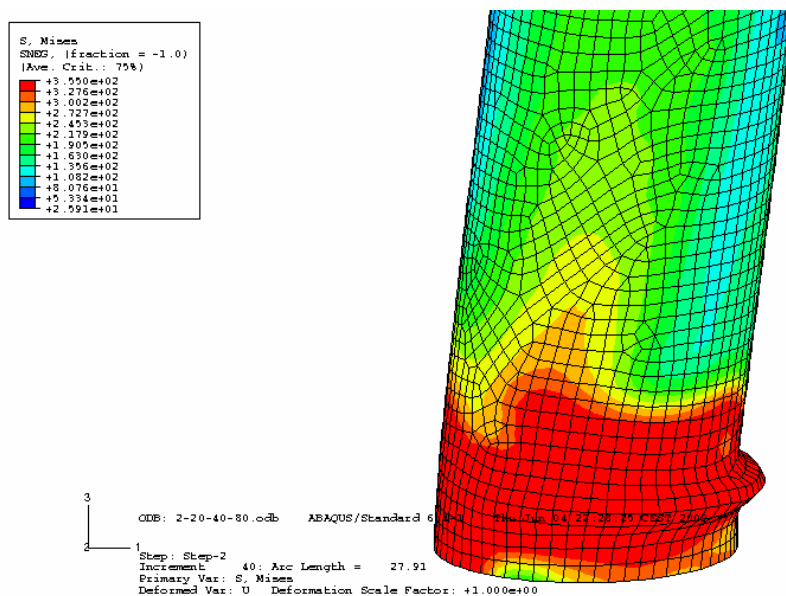
Càrrega del 80 %:

**Taula 7.30: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

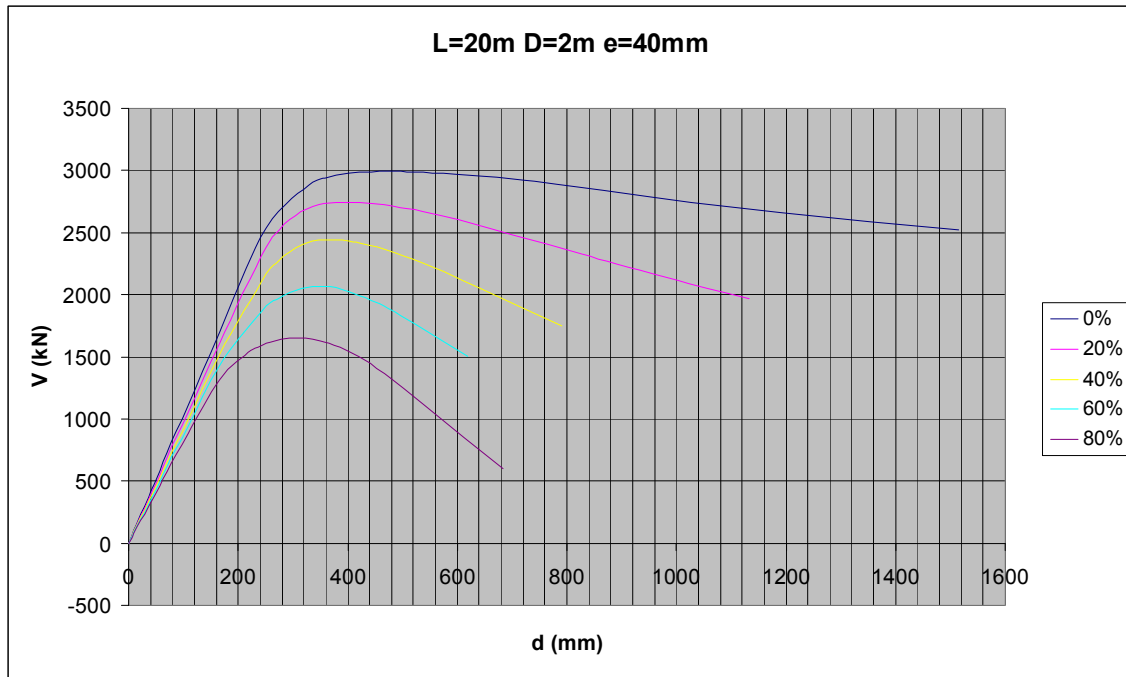
Ned = 71923 kN						
2-20-40-80						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-14,48	0,00	-0,01	#DIV/0!	9,90	#DIV/0!
0,05	40694,70	5,00	40,69	8,14	9,90	0,82
0,10	81403,50	10,00	81,40	8,14	9,90	0,82
0,18	142467,00	17,50	142,47	8,14	9,90	0,82
0,29	234061,00	28,75	234,06	8,14	9,90	0,82
0,46	371447,00	45,63	371,45	8,14	9,90	0,82
0,71	577365,00	70,94	577,37	8,14	9,90	0,82
1,09	885419,00	108,91	885,42	8,13	9,90	0,82
1,66	1319680,00	165,86	1319,68	7,96	9,90	0,80
2,23	1549070,00	222,81	1549,07	6,95	9,90	0,70
2,37	1581460,00	237,05	1581,46	6,67	9,90	0,67
2,51	1606800,00	251,29	1606,80	6,39	9,90	0,65
2,66	1625840,00	265,53	1625,84	6,12	9,90	0,62
2,80	1639320,00	279,77	1639,32	5,86	9,90	0,59
2,94	1647340,00	294,00	1647,34	5,60	9,90	0,57
3,08	1650380,00	308,24	1650,38	5,35	9,90	0,54
3,22	1648330,00	322,48	1648,33	5,11	9,90	0,52
3,37	1641530,00	336,72	1641,53	4,88	9,90	0,49
3,51	1629880,00	350,96	1629,88	4,64	9,90	0,47
3,65	1613620,00	365,20	1613,62	4,42	9,90	0,45
3,87	1578990,00	386,55	1578,99	4,08	9,90	0,41
4,19	1507030,00	418,59	1507,03	3,60	9,90	0,36
4,67	1367910,00	466,64	1367,91	2,93	9,90	0,30
5,39	1116720,00	538,72	1116,72	2,07	9,90	0,21
6,11	854397,00	610,81	854,40	1,40	9,90	0,14
6,83	599939,00	682,89	599,94	0,88	9,90	0,09
7,55	357899,00	754,97	357,90	0,47	9,90	0,05
8,27	129350,00	827,05	129,35	0,16	9,90	0,02
8,99	-87092,10	899,13	-87,09	-0,10	9,90	-0,01
10,07	-393164,00	1007,25	-393,16	-0,39	9,90	-0,04
11,69	-817677,00	1169,44	-817,68	-0,70	9,90	-0,07
13,32	-1210330,00	1331,62	-1210,33	-0,91	9,90	-0,09
14,94	-1579080,00	1493,80	-1579,08	-1,06	9,90	-0,11
16,56	-1929860,00	1655,98	-1929,86	-1,17	9,90	-0,12
18,18	-2266830,00	1818,17	-2266,83	-1,25	9,90	-0,13
19,80	-2592720,00	1980,35	-2592,72	-1,31	9,90	-0,13
21,43	-2909970,00	2142,53	-2909,97	-1,36	9,90	-0,14
23,05	-3220740,00	2304,72	-3220,74	-1,40	9,90	-0,14
24,67	-3526150,00	2466,90	-3526,15	-1,43	9,90	-0,14
26,29	-3827210,00	2629,08	-3827,21	-1,46	9,90	-0,15
27,91	-4124870,00	2791,26	-4124,87	-1,48	9,90	-0,15



**Figura 7.63: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 6 i càrrega del 80%.**



**Figura 7.64: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 6 i càrrega del 80%.**



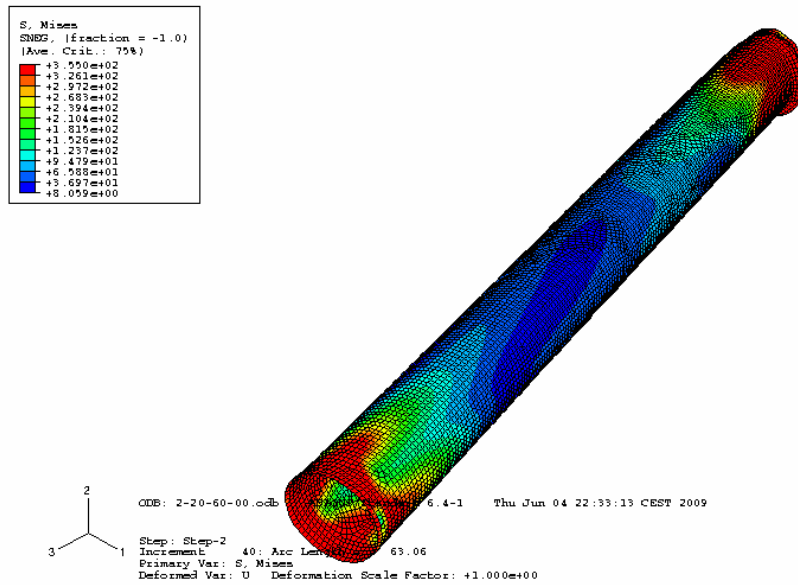
**Figura 7.65: Representació gràfica del comportament de la Peça 6 per a les càrregues del 0%, 20%, 40%, 60% i 80%.**

*Peça 7:*

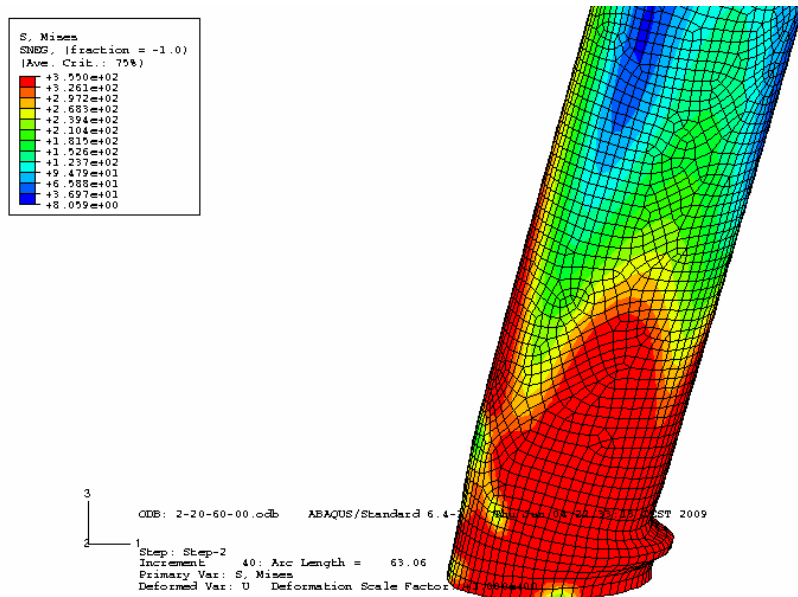
Càrrega del 0 %:

**Taula 7.31: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned =						
2-20-60-00						
v	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	0,00	0,00	0,00	#iDIV/0!	14,86	#iDIV/0!
0,05	79032,90	5,00	79,03	15,81	14,86	1,06
0,10	158066,00	10,00	158,07	15,81	14,86	1,06
0,18	276615,00	17,50	276,62	15,81	14,86	1,06
0,29	454439,00	28,75	454,44	15,81	14,86	1,06
0,46	721176,00	45,63	721,18	15,81	14,86	1,06
0,71	1121280,00	70,94	1121,28	15,81	14,86	1,06
1,09	1721410,00	108,91	1721,41	15,81	14,86	1,06
1,66	2613500,00	165,86	2613,50	15,76	14,86	1,06
2,51	3890800,00	251,29	3890,80	15,48	14,86	1,04
3,37	4438950,00	336,72	4438,95	13,18	14,86	0,89
4,22	4579870,00	422,15	4579,87	10,85	14,86	0,73
5,08	4628270,00	507,58	4628,27	9,12	14,86	0,61
5,93	4649370,00	593,01	4649,37	7,84	14,86	0,53
6,78	4658270,00	678,44	4658,27	6,87	14,86	0,46
7,64	4658720,00	763,87	4658,72	6,10	14,86	0,41
8,92	4646530,00	892,01	4646,53	5,21	14,86	0,35
10,20	4623960,00	1020,16	4623,96	4,53	14,86	0,31
11,48	4592720,00	1148,30	4592,72	4,00	14,86	0,27
12,76	4554010,00	1276,45	4554,01	3,57	14,86	0,24
14,05	4509620,00	1404,59	4509,62	3,21	14,86	0,22
15,33	4463620,00	1532,73	4463,62	2,91	14,86	0,20
16,61	4418650,00	1660,88	4418,65	2,66	14,86	0,18
17,89	4375610,00	1789,02	4375,61	2,45	14,86	0,16
19,81	4313410,00	1981,24	4313,41	2,18	14,86	0,15
21,73	4253990,00	2173,46	4253,99	1,96	14,86	0,13
23,66	4198830,00	2365,67	4198,83	1,77	14,86	0,12
25,58	4149200,00	2557,89	4149,20	1,62	14,86	0,11
28,46	4082870,00	2846,22	4082,87	1,43	14,86	0,10
31,35	4023490,00	3134,54	4023,49	1,28	14,86	0,09
34,23	3969980,00	3422,87	3969,98	1,16	14,86	0,08
37,11	3924100,00	3711,19	3924,10	1,06	14,86	0,07
40,00	3884890,00	3999,52	3884,89	0,97	14,86	0,07
42,88	3844470,00	4287,84	3844,47	0,90	14,86	0,06
45,76	3802970,00	4576,17	3802,97	0,83	14,86	0,06
48,64	3767460,00	4864,49	3767,46	0,77	14,86	0,05
51,53	3739060,00	5152,82	3739,06	0,73	14,86	0,05
54,41	3717450,00	5441,14	3717,45	0,68	14,86	0,05
57,29	3702080,00	5729,47	3702,08	0,65	14,86	0,04
60,18	3692310,00	6017,79	3692,31	0,61	14,86	0,04
63,06	3687620,00	6306,12	3687,62	0,58	14,86	0,04



**Figura 7.66: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 7 i càrrega del 0%.**



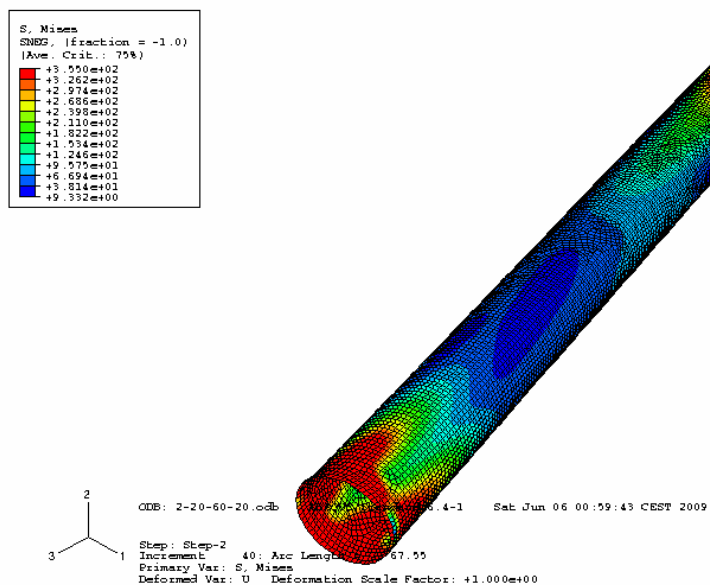
**Figura 7.67: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 7 i càrrega del 0%.**



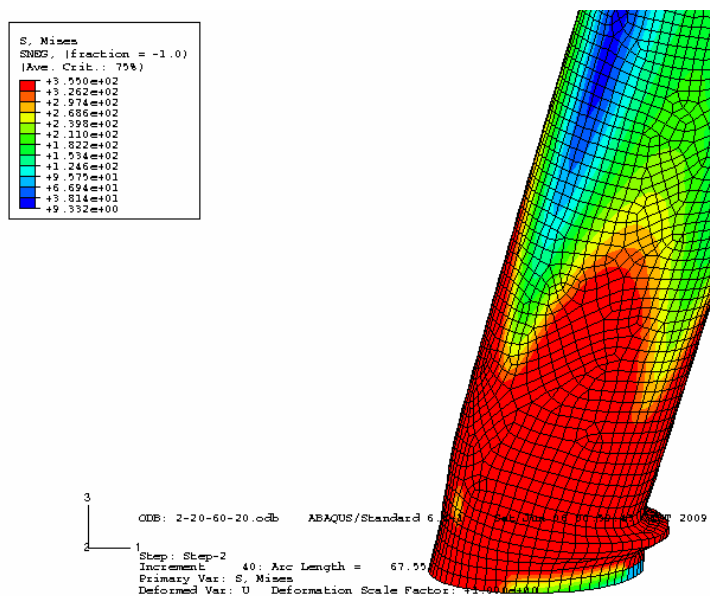
Càrrega del 20 %:

**Taula 7.32: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 26971 kN						
2-20-60-20						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-9,84	0,00	-0,01	#DIV/0!	14,86	#DIV/0!
0,05	75086,40	5,00	75,09	15,02	14,86	1,01
0,10	150183,00	10,00	150,18	15,02	14,86	1,01
0,18	262827,00	17,50	262,83	15,02	14,86	1,01
0,29	431794,00	28,75	431,79	15,02	14,86	1,01
0,46	685244,00	45,63	685,24	15,02	14,86	1,01
0,71	1065420,00	70,94	1065,42	15,02	14,86	1,01
1,09	1635240,00	108,91	1635,24	15,02	14,86	1,01
1,66	2482630,00	165,86	2482,63	14,97	14,86	1,01
2,51	3651520,00	251,29	3651,52	14,53	14,86	0,98
3,37	4147320,00	336,72	4147,32	12,32	14,86	0,83
4,22	4241610,00	422,15	4241,61	10,05	14,86	0,68
5,08	4235600,00	507,58	4235,60	8,34	14,86	0,56
5,93	4196620,00	593,01	4196,62	7,08	14,86	0,48
6,78	4142260,00	678,44	4142,26	6,11	14,86	0,41
7,64	4076540,00	763,87	4076,54	5,34	14,86	0,36
8,92	3957550,00	892,01	3957,55	4,44	14,86	0,30
10,20	3819980,00	1020,16	3819,98	3,74	14,86	0,25
11,48	3673150,00	1148,30	3673,15	3,20	14,86	0,22
12,76	3523550,00	1276,45	3523,55	2,76	14,86	0,19
14,05	3373810,00	1404,59	3373,81	2,40	14,86	0,16
15,33	3226730,00	1532,73	3226,73	2,11	14,86	0,14
16,61	3084130,00	1660,88	3084,13	1,86	14,86	0,12
18,53	2877350,00	1853,10	2877,35	1,55	14,86	0,10
21,41	2580010,00	2141,42	2580,01	1,20	14,86	0,08
24,30	2301040,00	2429,75	2301,04	0,95	14,86	0,06
27,18	2037300,00	2718,07	2037,30	0,75	14,86	0,05
30,06	1784200,00	3006,40	1784,20	0,59	14,86	0,04
32,95	1540750,00	3294,72	1540,75	0,47	14,86	0,03
35,83	1306910,00	3583,05	1306,91	0,36	14,86	0,02
38,71	1080950,00	3871,37	1080,95	0,28	14,86	0,02
41,60	862256,00	4159,70	862,26	0,21	14,86	0,01
44,48	649451,00	4448,02	649,45	0,15	14,86	0,01
47,36	441273,00	4736,35	441,27	0,09	14,86	0,01
50,25	236805,00	5024,67	236,81	0,05	14,86	0,00
53,13	35029,90	5313,00	35,03	0,01	14,86	0,00
56,01	-164756,00	5601,32	-164,76	-0,03	14,86	0,00
58,90	-362590,00	5889,65	-362,59	-0,06	14,86	0,00
61,78	-558811,00	6177,97	-558,81	-0,09	14,86	-0,01
64,66	-754079,00	6466,30	-754,08	-0,12	14,86	-0,01
67,55	-948880,00	6754,62	-948,88	-0,14	14,86	-0,01



**Figura 7.68: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 7 i càrrega del 20%.**

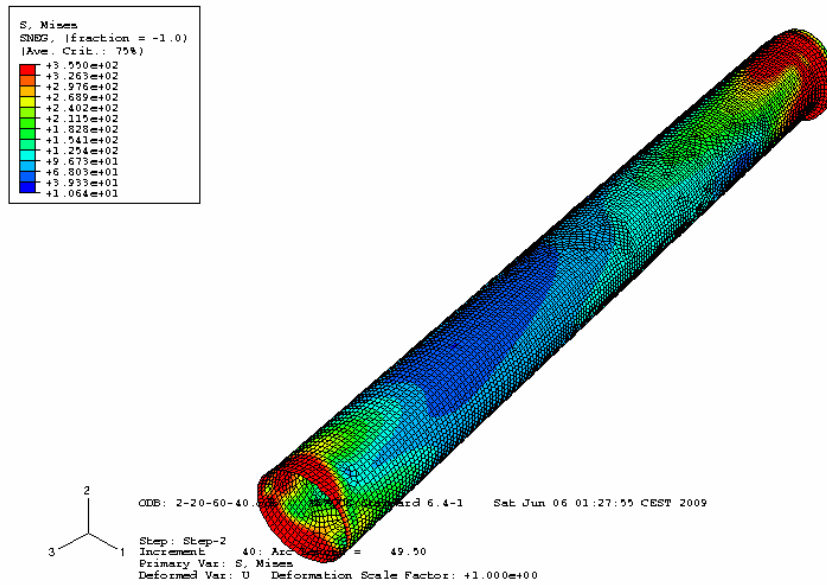


**Figura 7.69: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 7 i càrrega del 20%.**

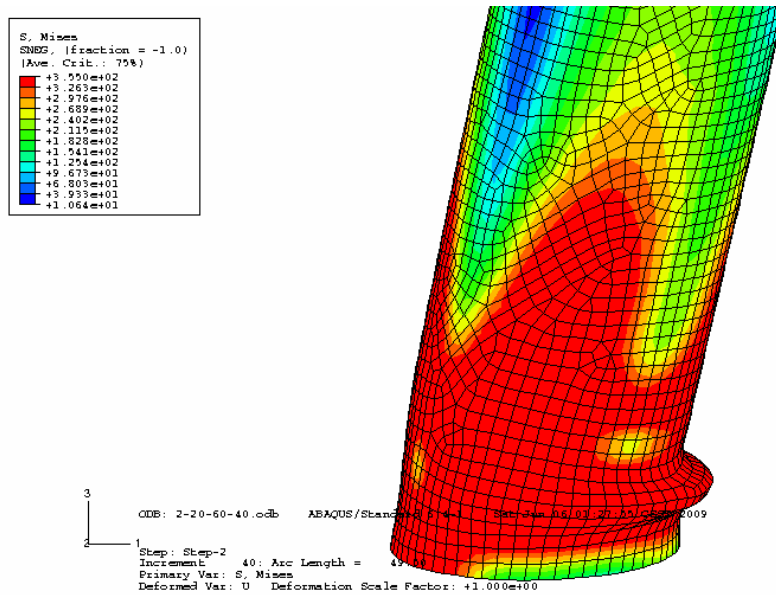
Càrrega del 40 %:

**Taula 7.33: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 53943 kN						
2-20-60-40						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-18,63	0,00	-0,02	#DIV/0!	14,86	#DIV/0!
0,05	71133,60	5,00	71,13	14,23	14,86	0,96
0,10	142286,00	10,00	142,29	14,23	14,86	0,96
0,18	249014,00	17,50	249,01	14,23	14,86	0,96
0,29	409107,00	28,75	409,11	14,23	14,86	0,96
0,46	649246,00	45,63	649,25	14,23	14,86	0,96
0,71	1009450,00	70,94	1009,45	14,23	14,86	0,96
1,09	1548450,00	108,91	1548,45	14,22	14,86	0,96
1,66	2349460,00	165,86	2349,46	14,17	14,86	0,95
2,51	3326910,00	251,29	3326,91	13,24	14,86	0,89
3,37	3735580,00	336,72	3735,58	11,09	14,86	0,75
4,22	3785520,00	422,15	3785,52	8,97	14,86	0,60
5,08	3722380,00	507,58	3722,38	7,33	14,86	0,49
5,93	3619770,00	593,01	3619,77	6,10	14,86	0,41
6,78	3494010,00	678,44	3494,01	5,15	14,86	0,35
7,64	3354070,00	763,87	3354,07	4,39	14,86	0,30
8,49	3202400,00	849,30	3202,40	3,77	14,86	0,25
9,35	3039490,00	934,73	3039,49	3,25	14,86	0,22
10,20	2868690,00	1020,16	2868,69	2,81	14,86	0,19
11,06	2695240,00	1105,59	2695,24	2,44	14,86	0,16
12,34	2433400,00	1233,73	2433,40	1,97	14,86	0,13
13,62	2175940,00	1361,87	2175,94	1,60	14,86	0,11
14,90	1924270,00	1490,02	1924,27	1,29	14,86	0,09
16,82	1558680,00	1682,24	1558,68	0,93	14,86	0,06
18,74	1208230,00	1874,45	1208,23	0,64	14,86	0,04
20,67	870671,00	2066,67	870,67	0,42	14,86	0,03
22,59	544523,00	2258,89	544,52	0,24	14,86	0,02
24,51	228108,00	2451,10	228,11	0,09	14,86	0,01
26,43	-80166,60	2643,32	-80,17	-0,03	14,86	0,00
28,36	-381696,00	2835,54	-381,70	-0,13	14,86	-0,01
30,28	-677365,00	3027,75	-677,37	-0,22	14,86	-0,02
32,20	-968129,00	3219,97	-968,13	-0,30	14,86	-0,02
34,12	-1253890,00	3412,19	-1253,89	-0,37	14,86	-0,02
36,04	-1535610,00	3604,40	-1535,61	-0,43	14,86	-0,03
37,97	-1813280,00	3796,62	-1813,28	-0,48	14,86	-0,03
39,89	-2087640,00	3988,84	-2087,64	-0,52	14,86	-0,04
41,81	-2359060,00	4181,05	-2359,06	-0,56	14,86	-0,04
43,73	-2627840,00	4373,27	-2627,84	-0,60	14,86	-0,04
45,65	-2894020,00	4565,49	-2894,02	-0,63	14,86	-0,04
47,58	-3157910,00	4757,70	-3157,91	-0,66	14,86	-0,04
49,50	-3419840,00	4949,92	-3419,84	-0,69	14,86	-0,05



**Figura 7.70: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 7 i càrrega del 40%.**

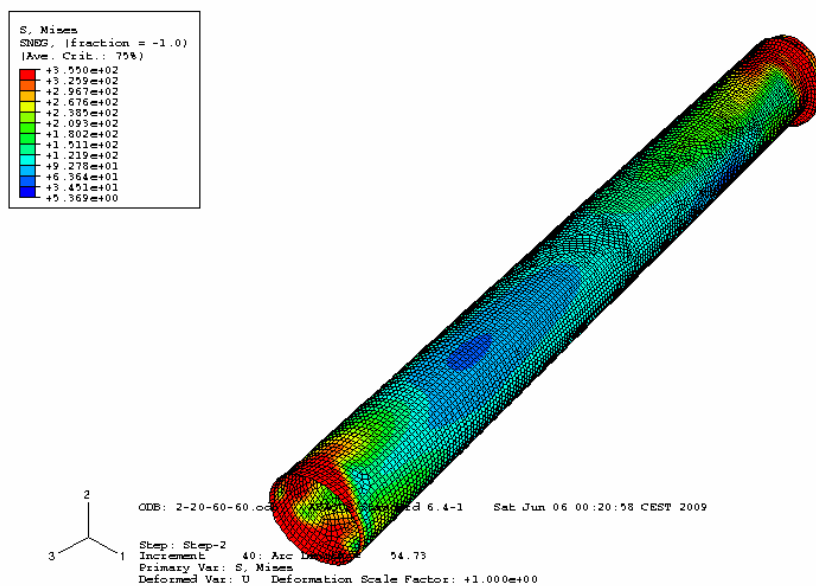


**Figura 7.71: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 7 i càrrega del 40%.**

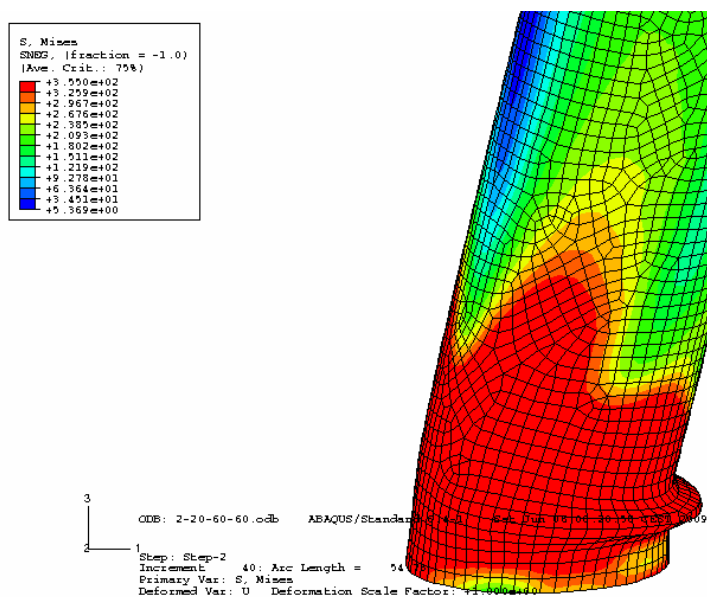
Càrrega del 60 %:

**Taula 7.34: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 80915 kN						
2-20-60-60						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-26,34	0,00	-0,03	#DIV/0!	14,86	#DIV/0!
0,05	67174,50	5,00	67,17	13,43	14,86	0,90
0,10	134375,00	10,00	134,38	13,44	14,86	0,90
0,18	235176,00	17,50	235,18	13,44	14,86	0,90
0,29	386378,00	28,75	386,38	13,44	14,86	0,90
0,46	613181,00	45,63	613,18	13,44	14,86	0,90
0,71	953225,00	70,94	953,23	13,44	14,86	0,90
1,09	1461120,00	108,91	1461,12	13,42	14,86	0,90
1,66	2211060,00	165,86	2211,06	13,33	14,86	0,90
2,51	2936890,00	251,29	2936,89	11,69	14,86	0,79
3,37	3211160,00	336,72	3211,16	9,54	14,86	0,64
4,22	3214320,00	422,15	3214,32	7,61	14,86	0,51
5,08	3090010,00	507,58	3090,01	6,09	14,86	0,41
5,93	2915580,00	593,01	2915,58	4,92	14,86	0,33
6,78	2714990,00	678,44	2714,99	4,00	14,86	0,27
7,64	2494490,00	763,87	2494,49	3,27	14,86	0,22
8,92	2131170,00	892,01	2131,17	2,39	14,86	0,16
10,20	1754350,00	1020,16	1754,35	1,72	14,86	0,12
11,48	1379530,00	1148,30	1379,53	1,20	14,86	0,08
12,76	1015140,00	1276,45	1015,14	0,80	14,86	0,05
14,05	662109,00	1404,59	662,11	0,47	14,86	0,03
15,33	320064,00	1532,73	320,06	0,21	14,86	0,01
17,25	-176675,00	1724,95	-176,68	-0,10	14,86	-0,01
19,17	-654065,00	1917,17	-654,07	-0,34	14,86	-0,02
21,09	-1115550,00	2109,38	-1115,55	-0,53	14,86	-0,04
23,02	-1564770,00	2301,60	-1564,77	-0,68	14,86	-0,05
24,94	-2003320,00	2493,82	-2003,32	-0,80	14,86	-0,05
26,86	-2433280,00	2686,04	-2433,28	-0,91	14,86	-0,06
28,78	-2856550,00	2878,25	-2856,55	-0,99	14,86	-0,07
30,70	-3274680,00	3070,47	-3274,68	-1,07	14,86	-0,07
32,63	-3687880,00	3262,69	-3687,88	-1,13	14,86	-0,08
34,55	-4097070,00	3454,90	-4097,07	-1,19	14,86	-0,08
36,47	-4502560,00	3647,12	-4502,56	-1,23	14,86	-0,08
38,39	-4905290,00	3839,34	-4905,29	-1,28	14,86	-0,09
40,32	-5305540,00	4031,55	-5305,54	-1,32	14,86	-0,09
42,24	-5703370,00	4223,77	-5703,37	-1,35	14,86	-0,09
44,16	-6099300,00	4415,99	-6099,30	-1,38	14,86	-0,09
46,08	-6493580,00	4608,20	-6493,58	-1,41	14,86	-0,09
48,97	-7083040,00	4896,53	-7083,04	-1,45	14,86	-0,10
51,85	-7670720,00	5184,85	-7670,72	-1,48	14,86	-0,10
54,73	-8257030,00	5473,18	-8257,03	-1,51	14,86	-0,10



**Figura 7.72: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 7 i càrrega del 60%.**

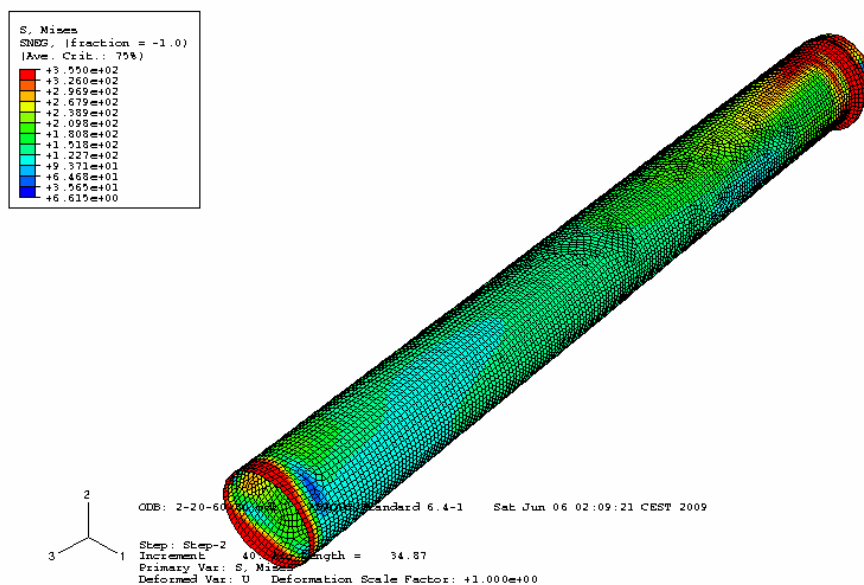


**Figura 7.73: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 7 i càrrega del 60%.**

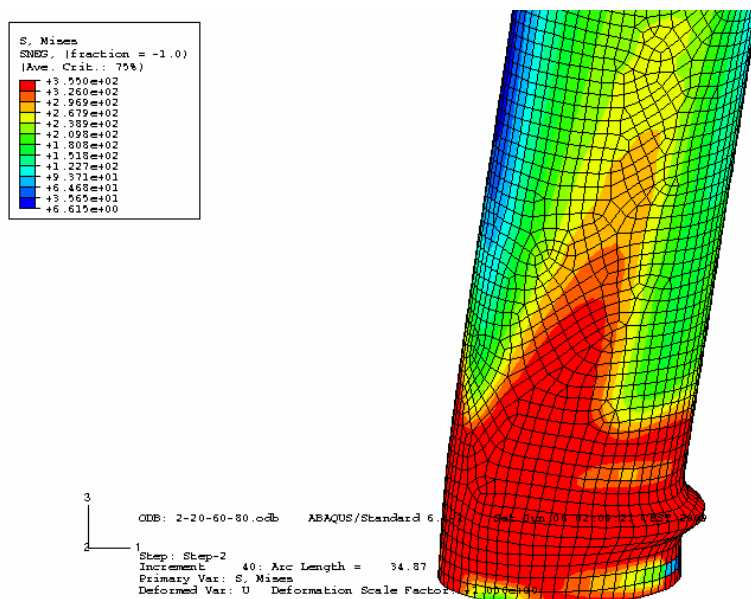
Càrrega del 80 %:

**Taula 7.35: Resultats obtinguts amb el programa Abaqus en el anàlisi no lineal.**

Ned = 107887 kN						
2-20-60-80						
x	b	d (mm)	V (kN)	Pendent	Pendent teoric	Pen/Pend teor
0,00	-32,71	0,00	-0,03	#DIV/0!	14,86	#DIV/0!
0,05	63209,00	5,00	63,21	12,64	14,86	0,85
0,10	126451,00	10,00	126,45	12,65	14,86	0,85
0,18	221313,00	17,50	221,31	12,65	14,86	0,85
0,29	363607,00	28,75	363,61	12,65	14,86	0,85
0,46	576957,00	45,63	576,96	12,65	14,86	0,85
0,71	896267,00	70,94	896,27	12,63	14,86	0,85
1,09	1371480,00	108,91	1371,48	12,59	14,86	0,85
1,66	2033280,00	165,86	2033,28	12,26	14,86	0,83
2,23	2386750,00	222,81	2386,75	10,71	14,86	0,72
2,80	2540630,00	279,77	2540,63	9,08	14,86	0,61
3,37	2594220,00	336,72	2594,22	7,70	14,86	0,52
3,94	2579000,00	393,67	2579,00	6,55	14,86	0,44
4,22	2544940,00	422,15	2544,94	6,03	14,86	0,41
4,51	2496970,00	450,63	2496,97	5,54	14,86	0,37
4,79	2437920,00	479,10	2437,92	5,09	14,86	0,34
5,08	2370620,00	507,58	2370,62	4,67	14,86	0,31
5,36	2297030,00	536,06	2297,03	4,29	14,86	0,29
5,65	2218310,00	564,53	2218,31	3,93	14,86	0,26
5,93	2135360,00	593,01	2135,36	3,60	14,86	0,24
6,36	2003780,00	635,72	2003,78	3,15	14,86	0,21
7,00	1792670,00	699,80	1792,67	2,56	14,86	0,17
7,64	1569000,00	763,87	1569,00	2,05	14,86	0,14
8,28	1332370,00	827,94	1332,37	1,61	14,86	0,11
8,92	1086650,00	892,01	1086,65	1,22	14,86	0,08
9,56	838804,00	956,08	838,80	0,88	14,86	0,06
10,20	591736,00	1020,16	591,74	0,58	14,86	0,04
10,84	347415,00	1084,23	347,42	0,32	14,86	0,02
11,80	-13526,30	1180,34	-13,53	-0,01	14,86	0,00
13,25	-539396,00	1324,50	-539,40	-0,41	14,86	-0,03
14,69	-1043970,00	1468,66	-1043,97	-0,71	14,86	-0,05
16,13	-1529480,00	1612,82	-1529,48	-0,95	14,86	-0,06
17,57	-2000860,00	1756,99	-2000,86	-1,14	14,86	-0,08
19,73	-2684670,00	1973,23	-2684,67	-1,36	14,86	-0,09
21,89	-3345830,00	2189,48	-3345,83	-1,53	14,86	-0,10
24,06	-3989890,00	2405,72	-3989,89	-1,66	14,86	-0,11
26,22	-4619820,00	2621,96	-4619,82	-1,76	14,86	-0,12
28,38	-5239160,00	2838,21	-5239,16	-1,85	14,86	-0,12
30,54	-5849920,00	3054,45	-5849,92	-1,92	14,86	-0,13
32,71	-6453250,00	3270,69	-6453,25	-1,97	14,86	-0,13
34,87	-7050210,00	3486,94	-7050,21	-2,02	14,86	-0,14

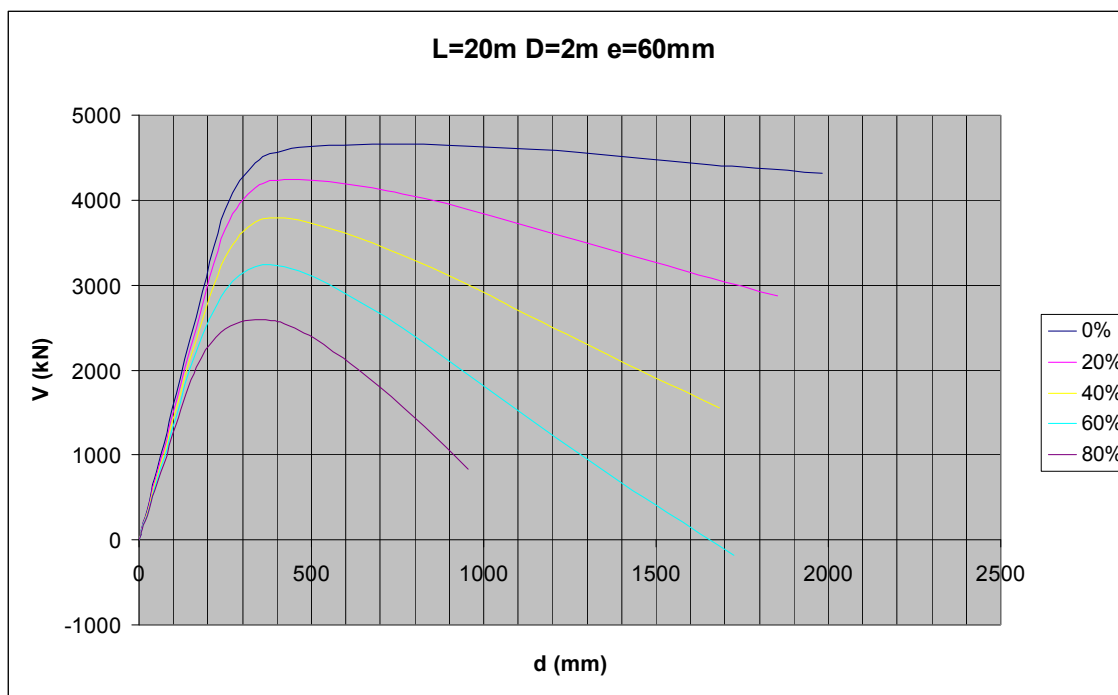


**Figura 7.74: Representació gràfica del resultat obtingut en l'anàlisi no lineal per a la peça 7 i càrrega del 80%.**



**Figura 7.75: Detall de la ròtula obtinguda en l'anàlisi no lineal per a la peça 7 i càrrega del 80%.**





**Figura 7.76: Representació gràfica del comportament de la Peça 7 per a les càrregues del 0%, 20%, 40%, 60% i 80%.**